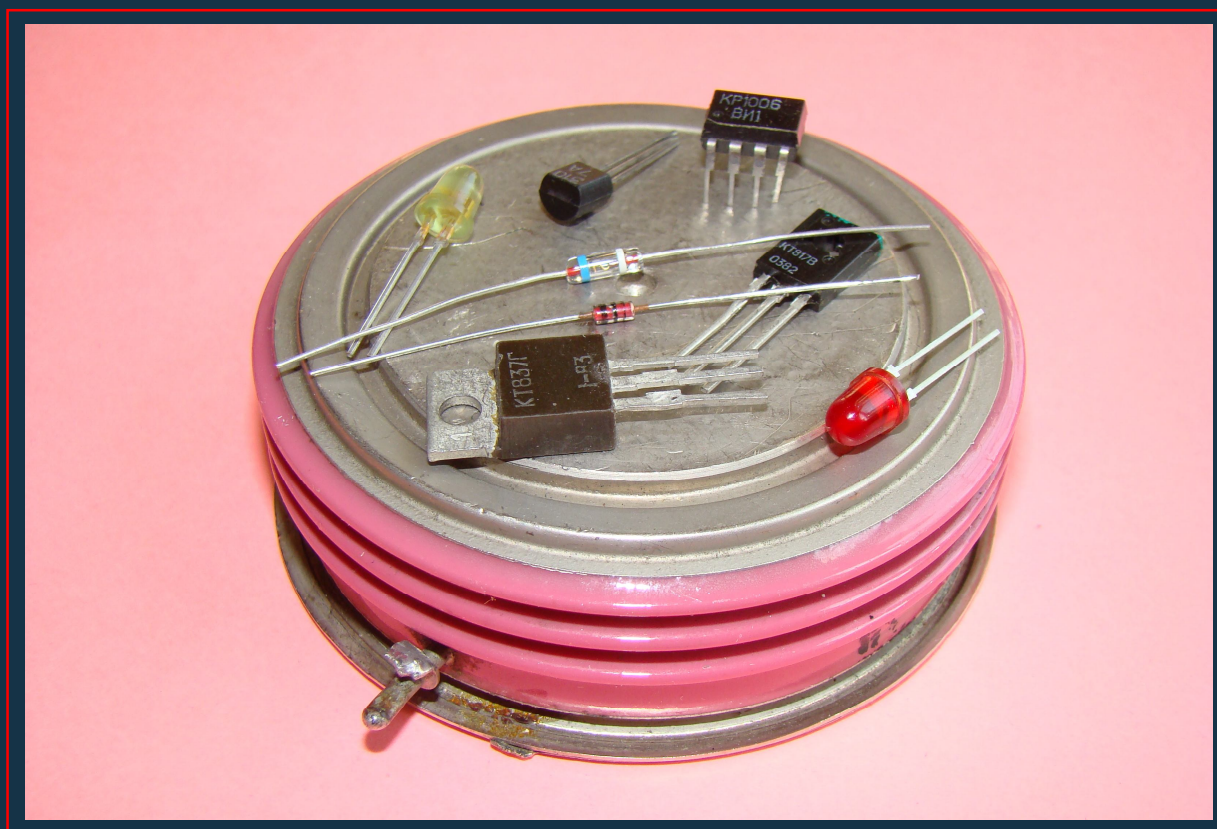


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
із навчальних дисциплін

«ІНФОРМАЦІЙНА ЕЛЕКТРОНІКА»
та
«ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ
ПРИСТРОЇ»

*(для студентів усіх форм навчання
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка)*



Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
із навчальних дисциплін**

**«ІНФОРМАЦІЙНА ЕЛЕКТРОНІКА»
та
«ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ
ПРИСТРОЇ»**

*(для студентів усіх форм навчання
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2020**

Лабораторний практикум із навчальних дисциплін «Інформаційна електроніка» та «Електронні перетворювальні пристрої» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 113 с.

Укладачі : канд. техн. наук Ю. П. Колонтаєвський,
д-р техн. наук Д. В. Тугай

Рецензент

Ягуп В. Г., доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 5 від 24.12.2019.

ЗМІСТ

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	4
ВСТУП	5
Лабораторна робота № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ	7
Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ	30
Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ	39
Лабораторна робота № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ НА ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ (ІМС)	50
Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ІМС	64
Лабораторна робота № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ	77
Лабораторна робота № 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ І ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА	96
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	110
ДОДАТОК А Зміст звіту про лабораторну роботу	111



ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

⚠ До виконання лабораторних робіт студенти допускаються після інструктажу з техніки електричної та протипожежної безпеки у лабораторії промислової електроніки, про що обов'язково робиться відповідний запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці.

⚠ Напруги на доступних для дотику виводах лабораторного устаткування не перевищують допустимих значень у 42 В для змінного струму та 110 В для постійного. Незважаючи на це, оскільки живлення устаткування та вимірювальних приладів здійснюється від мережі 220 В напруги змінного струму, при виконанні робіт не слід доторкатися одночасно до двох одиниць устаткування або приладів, а також до труб центрального опалення та використовувати у якості указок струмопровідні предмети (у т. ч. олівці з графітовим стрижнем).

⚠ Забороняється розміщувати на робочих місцях одяг та інші особисті речі, що не використовуються для роботи.

⚠ Забороняється без дозволу викладача переміщуватись на інші робочі місця, покидати робочі місця та межі лабораторії.

⚠ При виявленні несправності устаткування та вимірювальних приладів або відхилень у їхній роботі, їх необхідно знеструмити і повідомити про це викладачеві.

⚠ У разі виникнення нещасного випадку необхідно вимкнути живлення лабораторії, надати потерпілому першу допомогу, негайно сповістити викладача.

⚠ У разі виникнення загоряння у лабораторії необхідно вимкнути живлення лабораторії та загасити полум'я вогнегасником, негайно сповістити викладача.

⚠ Після закінчення виконання робіт необхідно вимкнути живлення устаткування та вимірювальних приладів, навести лад на робочому місці, сповістити викладача.

ВСТУП

Цей лабораторний практикум складено на основі робочих програм навчальних дисциплін «Інформаційна електроніка» та «Електронні перетворювальні пристрої». Він призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Метою виконання лабораторних робіт є формування у студентів знань і практичних навиків дослідження напівпровідникових електронних приладів і типових каскадів підсилювачів напруги змінного та постійного струмів; таких пристроїв імпульсної та цифрової техніки, як мульти-вібратори, тригери, логічні елементи, дешифратори, лічильники; пристроїв перетворювальної техніки: одно- і трифазних випрямлячів (у тому числі керованих), фільтрів, стабілізаторів напруги, інверторів. Практикум складається з семи лабораторних робіт.

У результаті виконання даних робіт студенти повинні засвоїти принципи дії транзисторів різного типу та типових електронних підсилювачів, що застосовуються у пристроях автоматики й обчислювальної техніки, промислової електроніки; принципи дії імпульсних пристроїв, комбінаційних і послідовнісних цифрових пристроїв, що складають основу сучасної цифрової електроніки і застосовуються у пристроях автоматики й обчислювальної техніки, промислової електроніки; принципи дії силових електронних пристроїв, що застосовуються для живлення пристроїв промислової електроніки та електронних приладів, на яких вони будуються.

Методика проведення лабораторних робіт пов'язана з наявністю необхідного устаткування і організацією робочих місць у лабораторії кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки, кількістю навчальних груп, що одночасно приступають до виконання лабораторних робіт.

Студенти повинні заздалегідь готуватися до занять у лабораторії, вивчаючи відповідні розділи теоретичного курсу за лекційними записами і навчальною літературою та знайомлячись зі змістом лабораторної роботи за методичними вказівками, наведеними у цьому практикумі. Також заздалегідь *необхідно заготовити таблиці для фіксації результатів експериментів і кальку або інший подібний прозорий матеріал для зняття осцилограм.*

Перед виконанням лабораторної роботи студенти знайомляться на робочому місці з приладами та устаткуванням. Експериментальна частина виконується самостійно відповідно до методичних вказівок під керівництвом і за контролем викладача з дотриманням правил техніки безпеки.

Результати вимірів і осцилограми студенти обробляють у лабораторії, аналізуючи результати кожного дослідження.

За результатами виконання лабораторної роботи складається звіт (форму наведено у додатку А). Звіт повинен бути складений чітко й акуратно. Особливу увагу варто приділяти формулюванню висновків за виконаною роботою, у яких необхідно зіставити результати експериментальних досліджень з відомими з теоретичного курсу закономірностями.

Схеми електричні принципові виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя. У схемах, формулах і таблицях необхідно використовувати стандартні умовні позначення.

Для здачі лабораторної роботи студент повинен представити повністю оформлений звіт, уміти пояснити будь-який з проведених дослідів і відповісти на контрольні запитання викладача.

Лабораторна робота № 1
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ
ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ

1 Мета роботи

1. Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора $n-p-n$ типу.
2. Дослідження статичних характеристик польового транзистора з керуючим $p-n$ переходом з каналом n -типу.
3. Дослідження властивостей одиночних підсилювальних каскадів зі спільним емітером (з СЕ) та зі спільним витоком (з СВ) і зі спільним колектором (з СК) та зі спільним стоком (з СС).

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 1, 3.
2. Вольтметр цифровий В7-27.
3. Мультиметр ВР11.
4. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Зняти і побудувати статичні вхідні і вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) біполярного транзистора.
2. Зняти і побудувати статичні вхідні і вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) польового транзистора.
3. Дослідити роботу одиночних підсилювальних каскадів за різних значень напруги вхідного сигналу і опору навантаження.

4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомтесь з робочим місцем, устаткуванням і приладами.
- 4.2 Увімкніть вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановіть у ліве положення.
- 4.3 Зніміть статичні вольт-амперні характеристики (далі – ВАХ) біполярного транзистора $n-p-n$ типу
 - 4.3.1 Зніміть статичні ВАХ біполярного і польового транзисторів за допомогою схеми, наведеної на рисунку 1.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного). Міліамперметр $PA1$, вольтметр $PV1$ і мікроамперметр $PA2$ встановлені на лицьовій панелі стенда. Елементи комутації і регулювання вмонтовані в мнемосхему.

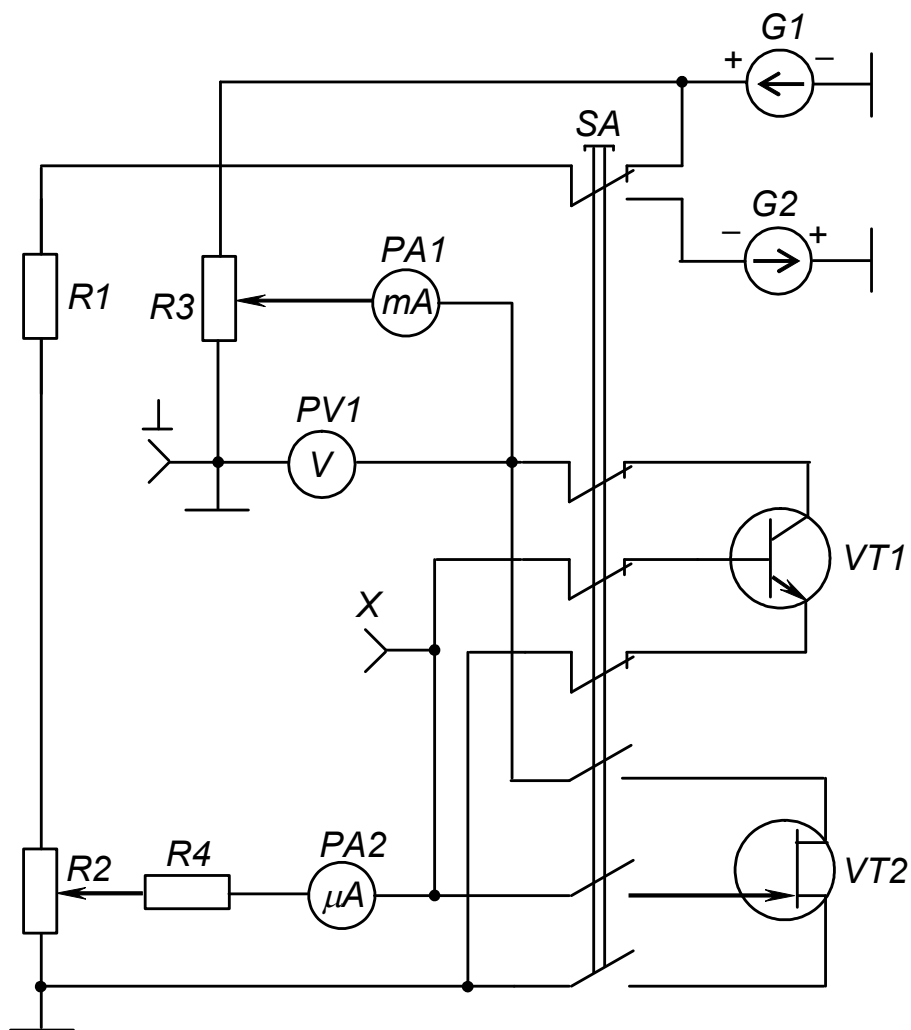


Рисунок 1.1 – Схема для зняття ВАХ біполярного і польового транзисторів

Для зняття ВАХ біполярного транзистора у схемі з СЕ перемикач *SA* встановіть у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч із транзистором *VT1*, що підмикається до джерела живлення, вимірювальних приладів і елементів регулювання). До клем *X* і \perp підімкніть мультиметр (або цифровий вольтметр), межу вимірювання якого встановіть орієнтовно 2 В, і задайте режим вимірювання напруги постійного струму.

Зібрану у такий спосіб схему досліду наведено на рисунку 1.2.

4.3.2 Зніміть сімейство входних ВАХ $I_B = f(U_{BE})$ при значеннях U_{KE} рівних 0; 5 і 10 В.

Фіксовані значення U_{KE} задавайте обертанням ручки резистора R_3 за годинниковою стрілкою, починаючи з крайнього лівого положення, і контролюючи за вольтметром *PV1*.

Обертаючи ручку резистора R_2 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення I_B за мікроамперметром *PA2* і фіксувати відповідні значення U_{BE} за вольтметром *PV2*.

Результати вимірів занесіть в таблицю 1.1.

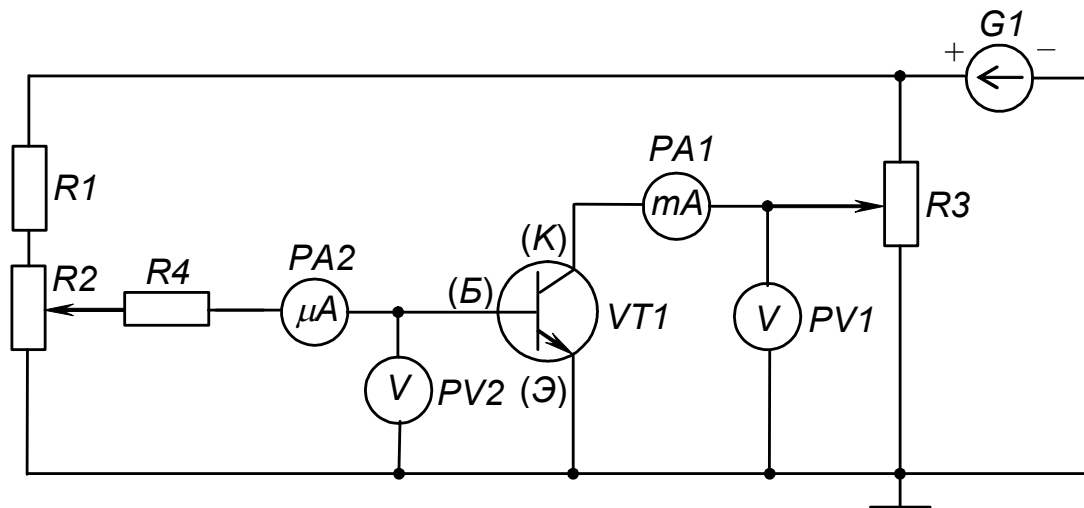


Рисунок 1.2 – Схема досліду зняття ВАХ біполярного транзистора $n-p-n$ типу

Таблиця 1.1 – Результати вимірів вхідних ВАХ біполярного транзистора

I_B , мкА	0	5	10	20	30	40	50	60	U_{KE} , В
U_{BE} , В									0
									5
									10
Примітка. У таблиці 1.1 позиції, що відповідають значенням I_B , і не можуть бути встановлені за допомогою резистора R_2 , не заповнювати.									

4.3.3 Зніміть сімейство вихідних ВАХ $I_K = f(U_{KE})$ при фіксованих значеннях струму I_B рівних 0; 10; 30; 50 і 60 мкА, що задаються резистором R_2 за мікроамперметром $PA2$.

Для кожного фіксованого значення I_B , обертаючи ручку резистора R_3 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення U_{KE} за вольтметром $PV1$ й фіксуйте за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму колектора I_K . Результати вимірів занесіть у таблицю. 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати вимірів вихідних ВАХ біполярного транзистора

U_{KE} , В	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	I_B , мкА
I_K , мА								0
								10
								30
								50
								60

4.4 Зніміть статичні вольт-амперні характеристики (ВАХ) польового транзистора з керуючим $p-n$ переходом

4.4.1 Для одержання схеми досліду зняття статичних ВАХ польового транзистора з СВ, наведеної на рисунку 1.3, перемикач SA встановіть у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч з транзистором $VT2$). Зверніть увагу на те, що полярність напруги $U_{ЗВ}$ негативна (необхідно відповідно підімкнути мультиметр $PV2$).

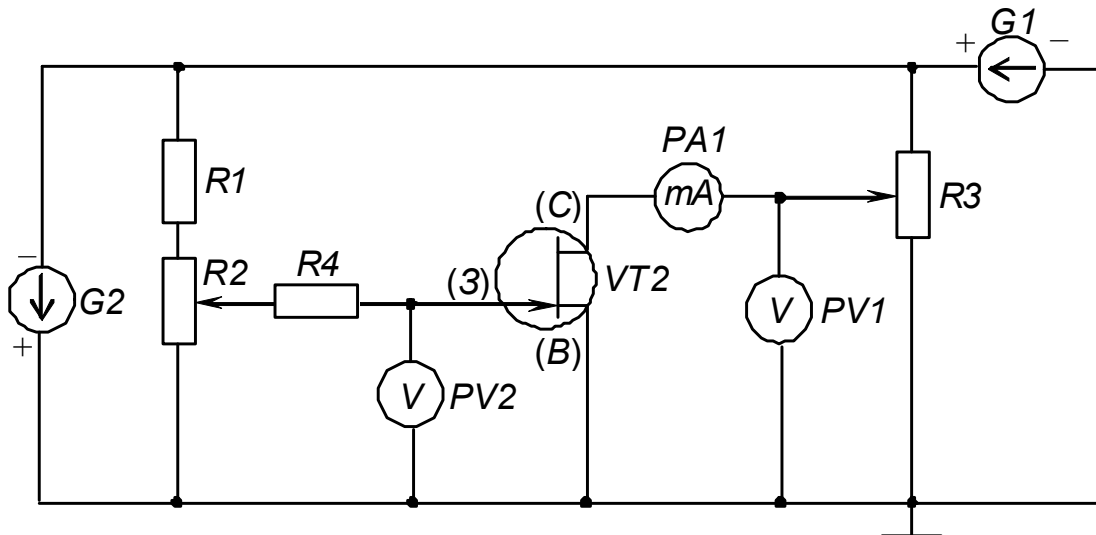


Рисунок 1.3 – Схема досліду зняття ВАХ польового транзистора з керуючим p - n переходом

4.4.2 Зніміть сімейство стік-затворних ВАХ $I_C = f(U_{ЗВ})$ при фіксованих значеннях напруги $U_{СВ}$ рівних 1; 5 і 10 В, що задаються резистором R_3 за вольтметром $PV1$.

Для кожного фіксованого значення $U_{СВ}$, обертанням ручки резистора R_2 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення $U_{ЗВ}$ за вольтметром $PV2$ і фіксуйте за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму стоку I_C .

Результати вимірів занесіть у таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати вимірів стік-затворних ВАХ польового транзистора

$U_{ЗВ}, \text{В}$	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8	$U_{СВ}, \text{В}$
$I_C, \text{мА}$										1
										5
										10

4.4.3 Зніміть сімейство вихідних (стокових) характеристик $I_C = f(U_{ЗВ})$ при фіксованих значеннях напруг на затворі $U_{ЗВ}$, що задаються резистором R_2 за цифровим вольтметром $PV2$.

Для кожного фіксованого значення $U_{ЗВ}$, обертаючи ручку резистора R_3 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення U_C за вольтметром $PV1$ і фіксуйте за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму I_C .

Результати вимірів занесіть у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати вимірів вихідних ВАХ польового транзистора

$U_{CB}, \text{В}$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	$U_{3B}, \text{В}$
$I_C, \text{мА}$								0
								-0,25
								-0,5
								-0,75
								-1,0
								-1,25

4.5 Дослідження властивостей одиночних підсилювальних каскадів з СЕ (СВ) і з СК (СС)

4.5.1 Дослідження властивостей одиночних підсилювальних каскадів на біполярному і польовому транзисторах виконуйте за допомогою схеми, наведеної на рисунку 1.4 (нижня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

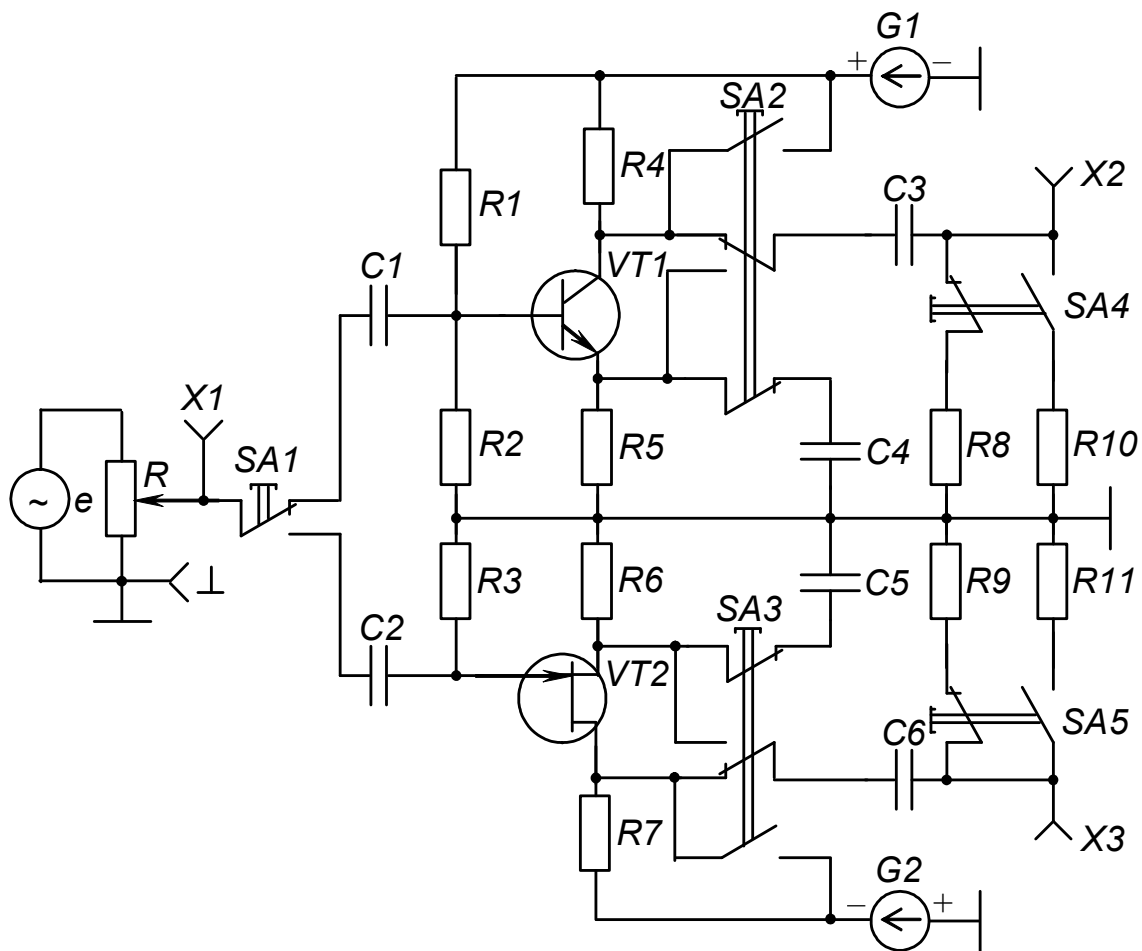


Рисунок 1.4 – Схема для дослідження властивостей одиночних підсилювальних каскадів

4.5.1.1 Підімкніть каскад на біполярному транзисторі VTI до джерела живлення GI і джерела вхідного сигналу e , встановивши перемикач $SA1$ у ненатиснуте положення.

Зберіть схему підсилюючого каскаду з CE , встановивши перемикач $SA2$ у ненатиснуте положення.

Підімкніть кабель першого каналу осцилографа сигнальним провідником до клеми $X1$, а нульовим до клеми \perp . Кабель другого каналу – до клем $X2$ і \perp відповідно.

Встановіть ручку резистора R у середнє положення, а органи керування осцилографа у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення. Переконайтеся у працездатності каскаду: синусоїдний сигнал на виході (клема $X2$) знаходиться у протифазі до вхідного сигналу (клема $X1$) і має більшу амплітуду (підсилений).

Зарисуйте осцилограми вхідного і вихідного сигналів каскаду для двох рівнів вхідного сигналу (задаються резистором R):

- 1) за відсутності помітних нелінійних викривлень вихідного сигналу;
- 2) за наявності помітних нелінійних викривлень вихідного сигналу.

4.5.1.2 Зніміть амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з CE для двох значень опору навантаження, що задаються перемикачем $SA4$ ($R_{н1} = 2,2 \text{ кОм}$ і $R_{н2} = 12 \text{ кОм}$).

До входу каскаду (клеми $X1$ і \perp) підімкніть цифровий вольтметр (вхід « $\sim 300 \text{ V}$ », межу вимірювання встановіть орієнтовно « $\sim 1 \text{ V}$ »), а до виходу, (клеми $X2$ і \perp) – мультиметр (межа вимірювання « $\sim 20 \text{ V}$ »).

Обертаючи ручку резистора R за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення вхідної напруги $U_{вх}$ за цифровим вольтметром і фіксуйте відповідні значення вихідної напруги $U_{вих}$ за мультиметром.

Виміри проведіть для двох значень опору навантаження:

- 1) $R_{н1} = R_8 = 2,2 \text{ кОм}$ (перемикач $SA4$ – у ненатиснутому положенні);
- 2) $R_{н2} = R_{10} = 12 \text{ кОм}$ (перемикач $SA4$ – у натиснутому положенні).

Результати вимірів занесіть у таблицю 1.5.

Таблиця 1.5 – Результати вимірів амплітудної характеристики для підсилювального каскаду з CE

$U_{вх}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$R_n, \text{ кОм}$
$U_{вих}, \text{ В}$							2,2
							12

4.5.1.3 Зберіть схему підсилюючого каскаду з CK (емітерний повторювач), установивши перемикач $SA2$ у натиснуте положення.

Підключіть осцилограф аналогічно пп. 4.5.1.1 і переконайтесь у працездатності каскаду: синусоїдний сигнал на виході за амплітудою

майже такий як і вхідний (дещо менший), відсутня інверсія (вихідна напруга синфазна вхідній) за будь-яких положень ручки резистора R .

Зарисуйте осцилограми вхідного і вихідного сигналів каскаду для середнього положення ручки резистора R .

4.5.1.4 Зніміть амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СК за методикою, викладеною в пп. 4.5.1.2. Результати вимірів занесіть у таблицю, аналогічну табл. 1.5.

4.5.2 Для дослідження підсилювальних каскадів на польовому транзисторі перемикач $SA1$ встановіть у натиснуте положення.

4.5.2.1 Зберіть схему підсилювального каскаду з СВ, встановивши перемикач $SA3$ у ненатиснуте положення.

4.5.2.2 зніміть амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СВ для двох значень опору навантаження ($R_{н1} = 10$ кОм і $R_{н2} = 100$ кОм).

Методика вимірів аналогічна наведеній у пп. 4.5.1.2, тільки вихідною клемою, до якої підмикається мультиметр, є $X3$, а завдання значення опору навантаження виконується перемикачем $SA5$:

1) $R_{н1} = R_9 = 10$ кОм ($SA5$ у ненатиснутому положенні);

2) $R_{н2} = R_{11} = 100$ кОм ($SA5$ у натиснутому положенні).

Результати вимірів занесіть у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Результати вимірів амплітудної характеристики для підсилювального каскаду з СВ

$U_{вх}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	$R_n, кОм$
$U_{вих}, В$								10
								100

4.5.2.3 Зберіть схему підсилювального каскаду з СС, встановивши перемикач $SA3$ у натиснуте положення.

4.5.2.4 Зніміть амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СС за методикою, викладеною в пп. 4.5.2.2.

Результати вимірів занесіть у таблицю, аналогічну табл. 1.6.

4.6 Вимкніть прилади і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 1.1 побудуйте сім'ю вхідних ВАХ біполярного транзистора. Зробіть висновок про вплив значення колекторної напруги U_{KE} на положення вхідної характеристики.

5.2 За даними таблиці 1.2 побудуйте сім'ю вихідних ВАХ біполярного транзистора, зробіть висновок про вплив значення струму бази I_B на положення вихідної характеристики.

5.3 За даними таблиці 1.3 побудуйте сім'ю стік-затворних ВАХ польового транзистора. Зробіть висновок про вплив значення напруги $U_{СВ}$

на положення стік-затворної характеристики.

5.4 За даними таблиці 1.4 побудуйте сім'ю стокових (вихідних) ВАХ польового транзистора. Зробіть висновок про вплив значення напруги на затворі $U_{зв}$ на положення стокової характеристики. Порівняйте вид стокових характеристик польового транзистора і вихідних характеристик біполярного транзистора.

5.5 За вихідними характеристиками біполярного транзистора визначте його коефіцієнт підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}.$$

5.6 За стік-затворними характеристиками польового транзистора визначте крутизну характеристики керування

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зв}} \right|_{U_{CB} = const} \quad \text{при } U_{CB} = 5 \text{ В},$$

а за стоковими характеристиками – внутрішній опір транзистора

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_{зв} = const} \quad \text{при } U_{зв} = -0,5 \text{ В}.$$

5.7. За осцилограмами, знятими при виконанні завдання пп. 4.5.1.1, зробіть висновок про правильність завдання режиму спокою підсилювального каскаду, що працює у режимі класу А.

5.8. За даними пп. 4.5.1.2 (табл. 1.5), пп. 4.5.1.4, пп. 4.5.2.2 (табл. 1.6) та пп. 4.5.2.4 побудуйте амплітудні характеристики підсилювальних каскадів і зробіть висновок про вплив значення опору навантаження на положення характеристик для каскаду з СЕ (СВ) і каскаду з СК (СС).

6 Пояснення до роботи

6.1.Будова і принцип дії біполярних транзисторів

Біполярний транзистор являє собою електронний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючих електронно-діркових переходи і складається з трьох областей: емітера, бази і колектора. $p-n$ перехід, що утворюється на межі областей емітер-база, називається емітерним, а на межі база-колектор – колекторним. Провідність бази може бути як електронною (n -типу), так і дірковою (p -типу). Відповідно розрізняють транзистори $p-n-p$ та $n-p-n$ типу.

На рисунку 1.5 схематично наведено будову і умовні графічні позначення транзисторів $n-p-n$ та $p-n-p$ типу.

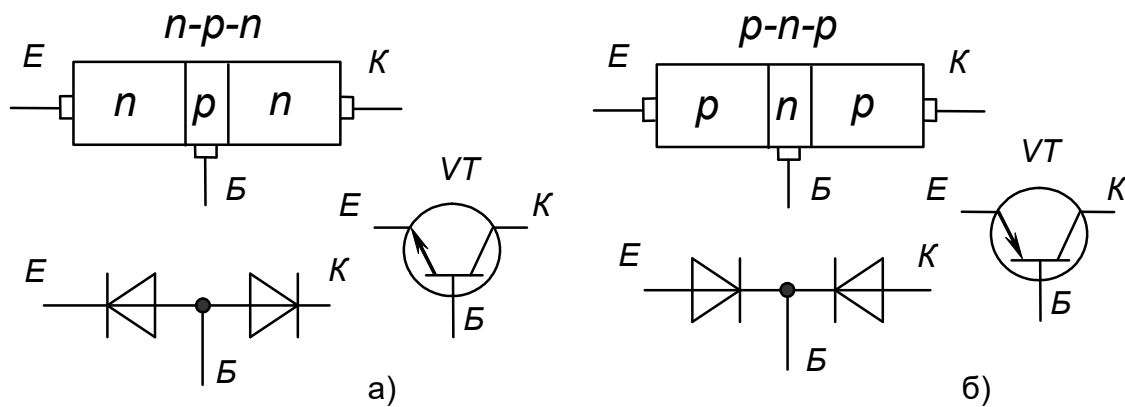


Рисунок 1.5 - Будова і умовні позначення транзисторів $n-p-n$ (а) та $p-n-p$ (б) типів

Для забезпечення ефективного впливу емітерного переходу на колекторний, а отже забезпечення підсилюючих властивостей транзистора, необхідне виконання наступних основних вимог (реалізуються технологічно при виробництві):

- 1) база повинна бути багато тоншою за довжину дифузійного пробігу інжектованих до неї з емітера носіїв електричного заряду;
- 2) концентрація основних носіїв у базі повинна бути значно меншою за концентрацію основних носіїв в емітері, а концентрація основних носіїв у колекторі повинна бути багато меншою, ніж в емітері;
- 3) площа колекторного переходу повинна бути у декілька разів більшою за площу емітерного переходу.

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Розходження полягає лише у тому, що в транзисторі $p-n-p$ типу основний струм, що тече через структуру, створюється дірками, інжектованими з емітера, а у транзисторі $n-p-n$ типу – електронами (напрямок протікання струму через транзистор вказує стрілка на його умовному позначенні).

Розглянемо принцип дії біполярного транзистора на прикладі транзистора структури $n-p-n$ типу.

Якщо до приладу не прикладена зовнішня напруга, через обидва $p-n$ переходи протікають струми дифузії і дрейфу, як і в звичайному діоді. Оскільки вони врівноважують один одного, сумарний струм через кожен $p-n$ перехід, а значить і через весь прилад дорівнює нулю.

Підмикання джерела E_K , як показано на рисунку 1.6, а, зміщує колекторний перехід у зворотному напрямку і, у результаті, через нього протікає невеликий струм, зумовлений дрейфом через перехід неосновних носіїв, що виникають з-за термогенерації (у даному разі, електронів) – струм I_{K0} .

Якщо підімкнути до транзистора також джерело E_E (між базою і емітером), як показано на рисунку 1.6, б, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, і через нього до бази з емітера інjektується велика кількість носіїв (електронів) – струм I_E .

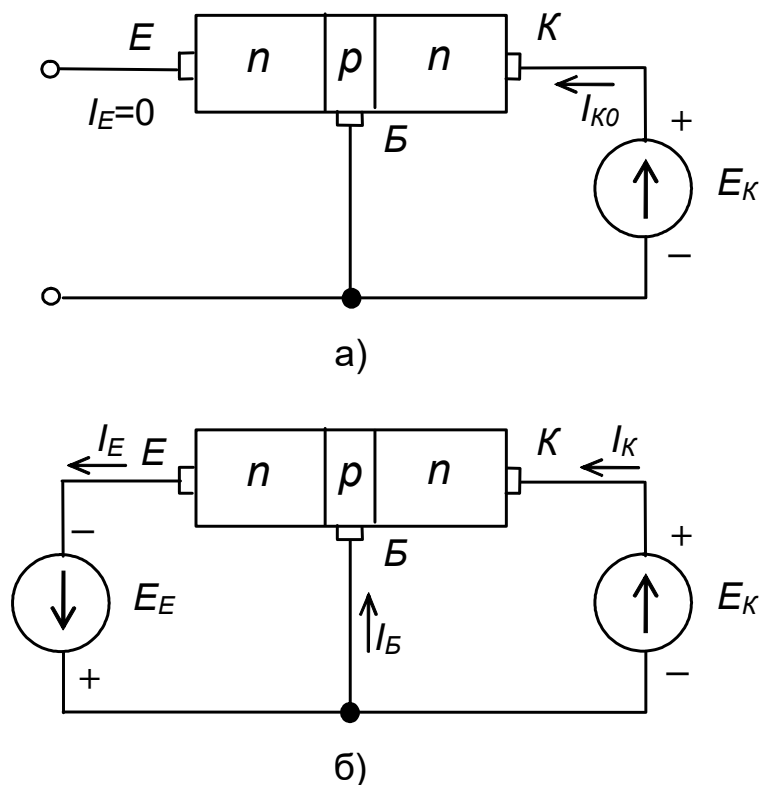


Рисунок 1.6 – Спрощена схема вмикання транзистора

Через те, що у базі основних носіїв (дірок) набагато менше, ніж у емітері (електронів) і товщина бази незначна, тільки невелика частина електронів, що надходять з емітера в базу, буде встигати рекомбінувати з дірками і створювати струм бази I_B . Електрони, що залишилися, починають дифундувати у базі за всіма напрямками, у тому числі і до колекторного переходу. Потрапляючи в область колектора, вони підпадають під дію поля джерела E_K і спрямовуються до його позитивного електроду (вони тут є потоком основних носіїв заряду), створюючи струм колектора I_K .

Оскільки виходить, що струм бази (керуючого електрода) набагато менший струму колектора (струму силового кола), транзистор має підсилюючі властивості.

Струми електродів транзистора зв'язані співвідношенням:

$$I_E = I_B + I_K, \quad (1.1)$$

де I_E – струм емітера;

I_B – струм бази;

I_K – струм колектора.

Відношення струму колектора до струму емітера називається коефіцієнтом передачі струму емітера

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}. \quad (1.2)$$

Відношення колекторного струму до базового називається коефіцієнтом підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K}{I_E - I_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (1.3)$$

У сучасних транзисторів α знаходиться у межах від 0,9 до 0,99, а β – від 10 до 100 і більше.

Зв'язок струмів електродів біполярного транзистора і прикладених між його електродами напругами ілюструється статичними вольт-амперними характеристиками (ВАХ): вхідними і вихідними. Вид цих характеристик залежить від схеми вмикання транзистора.

Залежно від того, який з електродів транзистора є спільною точкою за змінним струмом для вхідного і вихідного кіл, можливі три способи вмикання: зі спільною базою (з СБ) – рисунок 1.7, а; зі спільним емітером (з СЕ) – рисунок 1.7, б; зі спільним колектором (з СК) – рисунок 1.7, в.

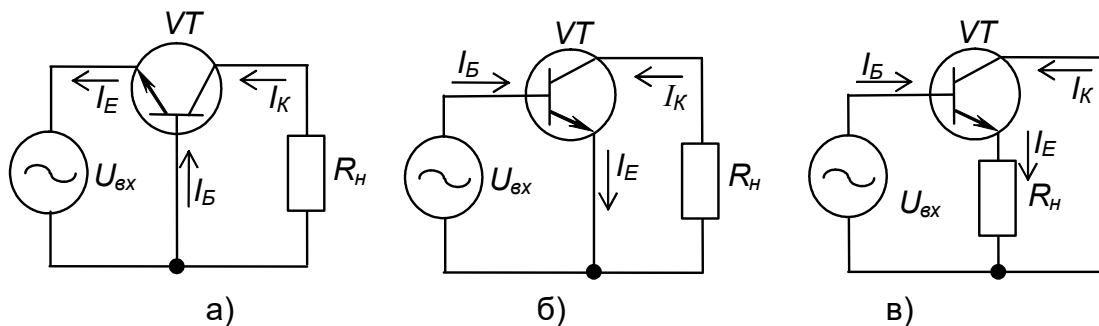


Рисунок 1.7 – Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

Найбільше поширення у підсилюючих каскадах та імпульсних пристроях одержала схема з СЕ як така, що дає найбільше підсилення за потужністю, забезпечуючи підсилення і за напругою, і за струмом.

Вхідні і вихідні ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, наведено на рисунку 1.8.

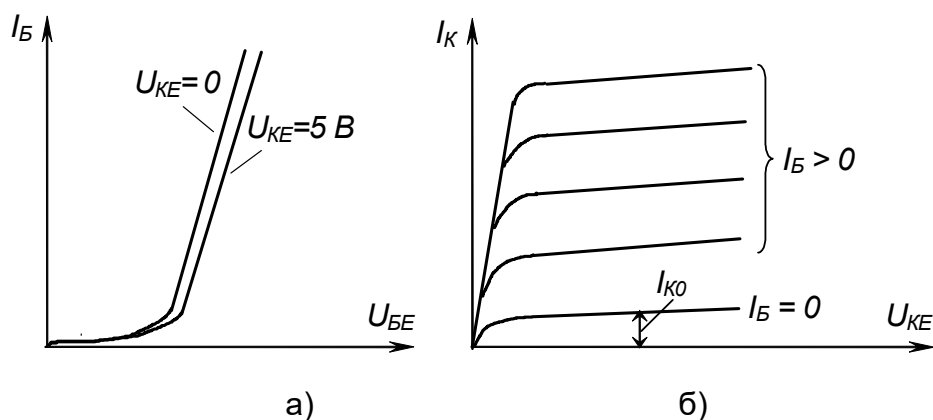


Рисунок 1.8 – ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ:
а) вхідні; б) вихідні

Вхідні характеристики показують зв'язок між струмом бази I_B і напругою, прикладеною між емітером і базою U_{BE} .

Вхідна характеристика, як видно з (рисунку 1.8, а, при $U_{KE} = 0$ подібна до прямої гілки ВАХ діода. При $U_{KE} > 0$ вхідні характеристики дещо зміщуються вправо. Зменшення струму бази при цьому пояснюється зменшенням рекомбінацій у базі при її звуженні за рахунок розширення запираючого шару (зворотно зміщеного колекторного $p-n$ переходу).

Вихідні статичні характеристики, наведені на рисунку 1.8, б, показують зв'язок між струмом колектора I_K та напругою між колектором і емітером U_{KE} залежно від значення струму бази I_B . При $I_B = 0$ маємо ВАХ зворотно зміщеного колекторного $p-n$ переходу. Зі збільшенням I_B струм колектора збільшується. При цьому його значення залежить від значення I_B і (десь при $U_{KE} > 1$ В) майже не залежить від значення U_{KE} , бо визначається тільки кількістю носіїв, що після інжекції із емітера в базу дифундували із бази в колектор.

На рисунку 1.9, а показано лінію навантаження за постійним струмом (динамічну характеристику) і зони, що відповідають трьом характерним режимам роботи транзистора. Рівняння лінії навантаження має такий вигляд:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K, \quad (1.4)$$

де E_K – напруга живлення;

R_K – навантаження транзистора за постійним струмом.

Лінія навантаження за постійним струмом проводиться через точки:

E_K , що відповідає $I_K = 0$ (режиму холостого ходу);

$I_K = E_K / R_K$, що відповідає $U_{KE} = 0$ (режиму короткого замикання).

Точка *a* відповідає режиму відсічки транзистора, при якому струм у колі навантаження дуже малий, внаслідок чого майже вся напруга джерела живлення прикладається до транзистора.

Точка *б* відповідає режиму насичення транзистора. У цьому режимі на транзисторі падає незначна напруга (до 0,1–0,3 В), що практично не залежить від зміни керуючого струму бази. Відповідно напруга і струм у колі навантаження залишаються незмінними.

Проміжок між точками *a* і *б* відповідає активному режиму.

Режими насичення і відсічки використовуються в ключових (імпульсних) схемах, а активний режим – у лінійних підсилювачах.

Так для підсилювального каскаду, що працює у режимі класу А, перетин лінії навантаження з характеристикою, яка відповідає струму бази $I_{0Б}$ (робоча точка *P*), визначає струм спокою $I_{0К}$. Цей струм протікає у колі колектора за відсутності сигналу змінної напруги у вхідному колі і відповідає напрузі спокою за постійним струмом $U_{0К}$. Забезпечується режим спокою поданням у вхідне коло транзистора напруги зміщення $U_{0Б}$ з-за чого протікає струм спокою бази $I_{0Б}$, як це показано на рисунку 1.9, б.

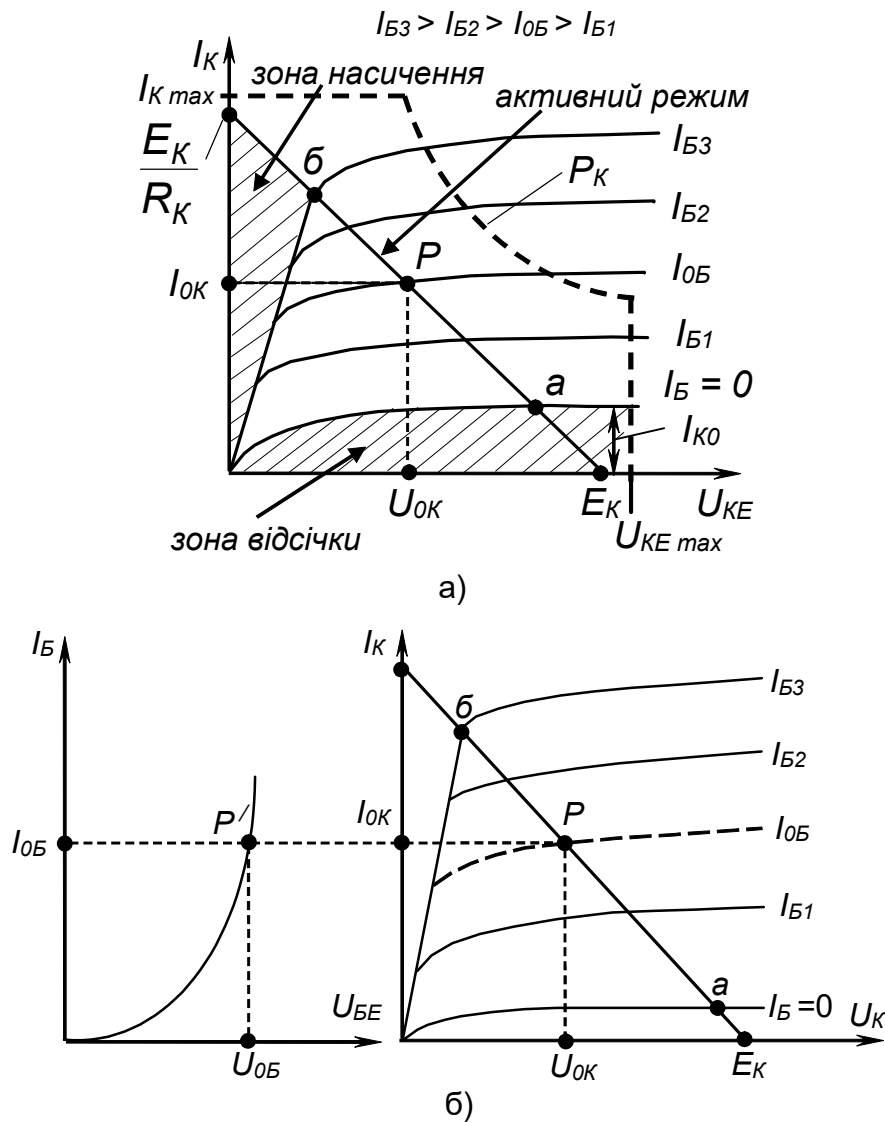


Рисунок 1.9 – Побудова динамічної характеристики транзистора за постійним струмом і режими роботи транзистора

6.2 Підсилювальні каскади на біполярних транзисторах

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричних сигналів без спотворення їхньої форми і частоти (для лінійного підсилювача).

Необхідність у підсилювачі виникає тоді, коли потужність джерела сигналу менша від потужності навантаження. У такому разі послідовно з навантаженням вмикають зовнішнє потужне джерело живлення і підсилюючий елемент. Джерело сигналу діє не безпосередньо на навантаження, а на вхід підсилюючого елементу і, змінюючи провідність останнього, забезпечує пропорційні вхідному сигналу зміни струму у колі навантаження. У результаті в навантаженні виділяється необхідна потужність за рахунок енергії джерела живлення.

Таким чином, у самому загальному вигляді, для підсилення необхідна схема, наведена на рисунку 1.10.

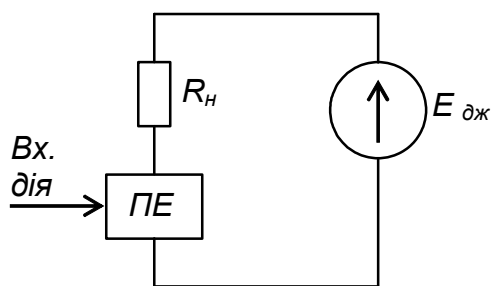


Рисунок 1.10 – Узагальнена схема підсилення

Вона складається з навантаження R_n , джерела живлення $E_{дж}$ та деякого гіпотетичного підсилюючого елемента ПЕ.

Малопотужна вхідна дія (Вх. дія) змінює параметри ПЕ так, що пропорційно їй змінюється потужність, яка виділяється в R_n за рахунок $E_{дж}$.

Найпростіший вузол, що забезпечує підсилення електричних сигналів, називається підсилювальним каскадом.

Схема одиночного транзисторного підсилювального каскаду зі спільним емітером (схема з СЕ), що забезпечує підсилення сигналів напруги змінного струму як за напругою, так і за струмом, наведена на рисунку 1.11.

Силowe коло каскаду складають джерело живлення E_K , резистор

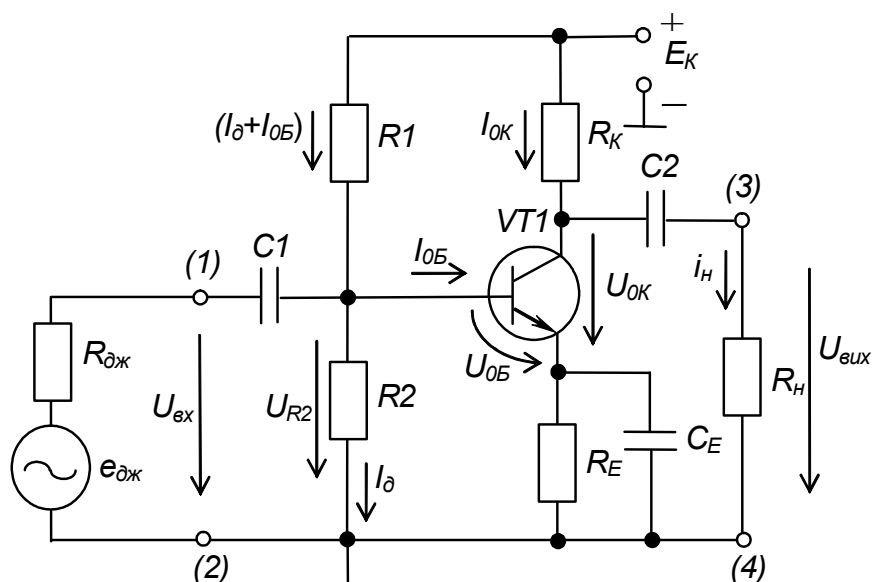


Рисунок 1.11 – Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі з СЕ

колекторного навантаження R_K і підсилюючий елемент – транзистор $VT1$.

Джерело підсилюваного сигналу підмикається до вхідного кола каскаду через конденсатор C_1 – точки (1) і (2).

Навантаження каскаду у даному випадку таке, що вимагає обов'язкового під'єднання одного з виводів до нульової точки (найчастіше таким навантаженням є наступний підсилюючий каскад). Тому воно підімкнене до виходу каскаду через конденсатор C_2 – точки (3) і (4).

Конденсатори розділяють кола за постійним струмом (постійний струм через конденсатор не протікає) і зв'язують їх за змінним. Вони виключають вплив постійної складової напруги джерела сигналу (якщо вона є) на вхідні кола каскаду і навпаки – напруги постійного струму вхідних кіл каскаду на джерело вхідного сигналу (C_1), а також вплив постійної складової вихідної напруги на навантаження (C_2).

Напруга на базі транзистора у режимі спокою (за відсутності вхідного сигналу змінної напруги) U_{0B} визначається дільником напруги R_1 , R_2 і резистором R_E . Вона забезпечує струм бази I_{0B} і відповідно струм колектора I_{0K} – режим за постійним струмом.

Для забезпечення температурної стабілізації режиму спокою каскаду у коло емітера включають резистор R_E . Він забезпечує негативний зворотний зв'язок за струмом дія якого полягає у наступному.

Оскільки напруга спокою бази

$$U_{0B} = U_{R2} - I_{0E}R_E, \quad (1.4)$$

де U_{R2} – напруга на резисторі R_2 ;
а струм спокою емітера

$$I_{0E} = I_{0K} + I_{0B},$$

то, наприклад, при збільшенні $I_{0E} \approx \beta I_{0B}$, за рахунок зростання коефіцієнта підсилення струму транзистора β під впливом зміни температури навколишнього середовища, збільшується I_{0E} . А значить збільшується і падіння напруги на R_E . За (1.4) це призводить до зменшення U_{0B} , що зменшує значення базового струму I_{0B} . У результаті цього I_{0K} наближається до попереднього значення.

Для усунення такого ж ефекту за змінним струмом (для виключення негативного зворотного зв'язку за підсилюваним сигналом) R_E за змінним струмом зашунтовано конденсатором C_E . Опір цього конденсатора на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опір резистора R_E .

У режимі спокою струми бази і колектора постійні. Напруга спокою на колекторі транзистора

$$U_{0K} = E_K - I_{0K}(R_K + R_E). \quad (1.5)$$

При подачі вхідної змінної напруги на постійну складову струму I_{0B} накладається змінна складова, і струм бази стає пульсуючим. Відповідно пульсуючими стають струм колектора з амплітудою пульсацій I_{Km} і колекторна напруга з амплітудою U_{Km} , як показано на графіку, наведеному на рисунку 1.12.

Змінна складова колекторної напруги через конденсатор C_2 передається на навантаження. Опір конденсатора C_2 на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опори резистора R_K і навантаження R_n .

Оскільки вихідний опір каскаду практично дорівнює опору резистора R_K , то зміни опору навантаження R_n суттєво впливають на діюче значення вихідної напруги.

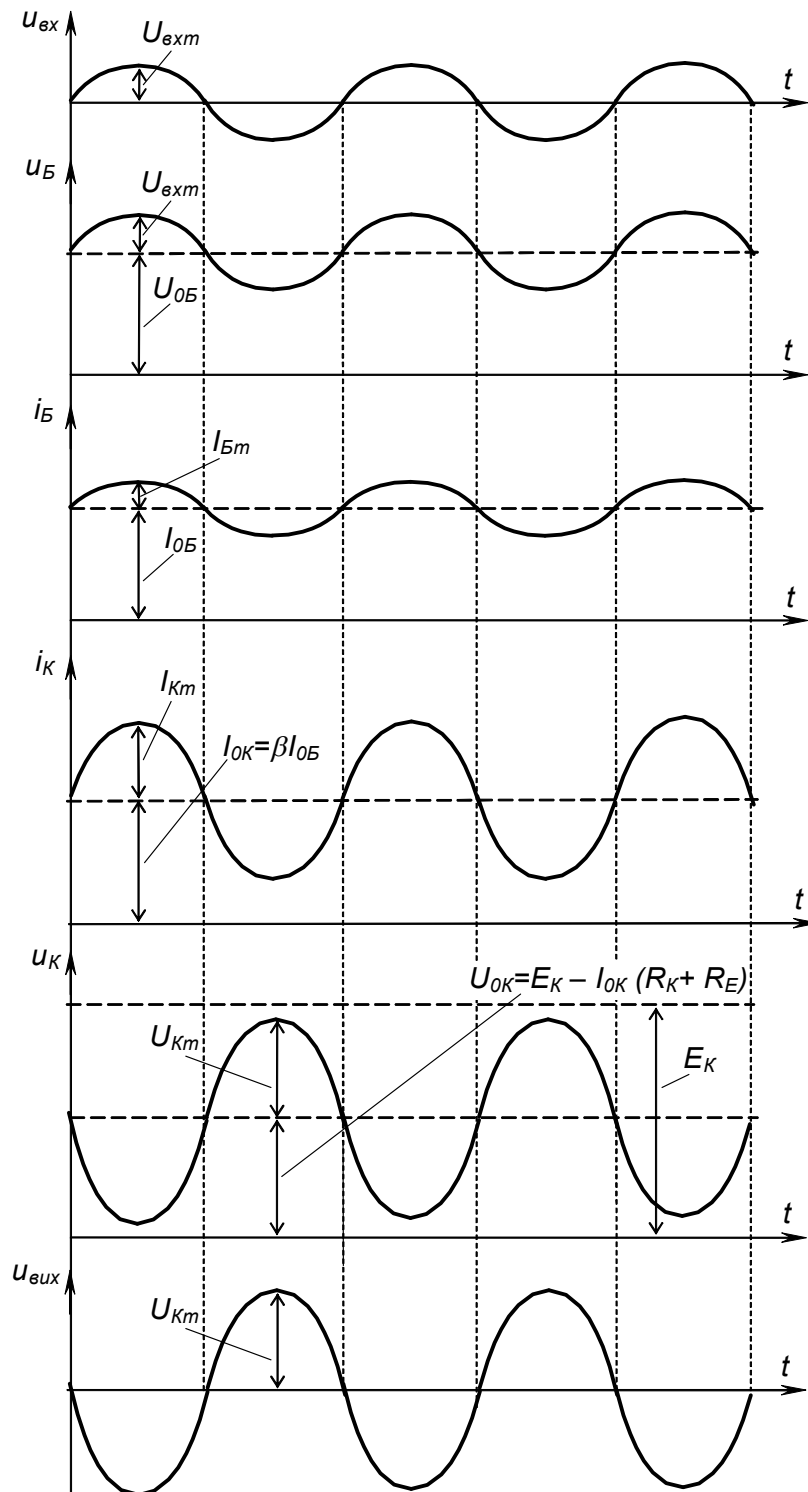


Рисунок 1.12 – Часові діаграми роботи підсилювального каскаду з СЕ

З графіка також видно, що, наприклад, зі збільшенням миттєвих значень струму колектора миттєві значення напруги на колекторі зменшуються. При цьому зміни струму колектора пропорційні змінам вхідної напруги, а фаза напруги на колекторі зміщена відносно фази вхідної напруги на 180° – кажуть, що підсилюючий каскад з СЕ інвертує вхідний сигнал.

Схема транзисторного одиночного підсилювального каскаду зі спільним колектором (схема з СК), що забезпечує підсилення сигналів напруги змінного струму тільки за струмом, зображена на рисунку 1.13.

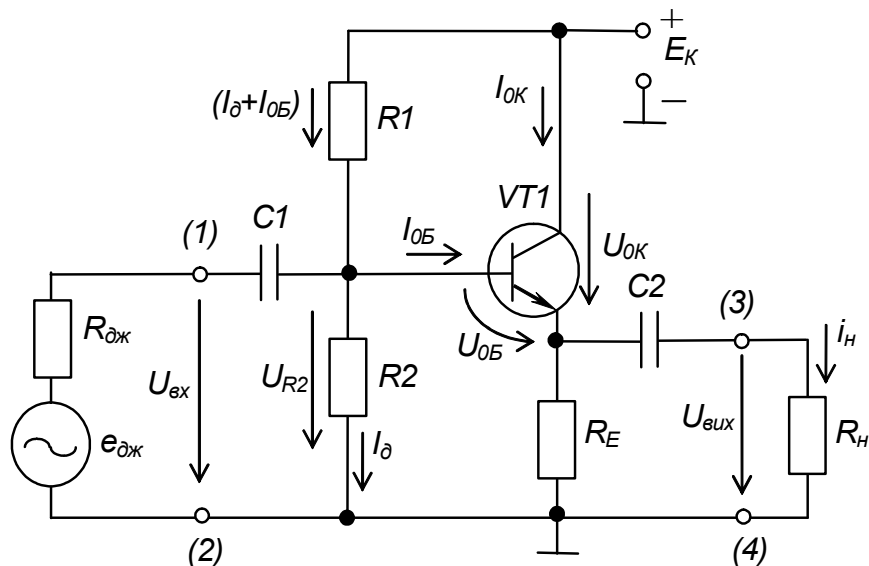


Рисунок 1.13 – Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі з СК (емітерний повторювач)

Призначення елементів R_1 , R_2 та C_1 і C_2 те ж саме, що і у схемі каскаду з СЕ. Опір R_E є навантаженням за постійним струмом і визначає положення динамічної характеристики каскаду.

Каскад з СК можна розглядати як каскад з СЕ при $R_K = 0$ і опором у колі емітера, не зашунтованим конденсатором C_E . У результаті в схемі діє стопроцентний послідовний негативний зворотний зв'язок за струмом, що знижує коефіцієнт підсилення за напругою до одиниці (реально він становить навіть менше одиниці) і водночас збільшує вхідний опір та зменшує вихідний.

Цей каскад не інвертує вхідний сигнал, бо зі збільшенням миттєвих значень струму колектора миттєві значення напруги на навантаженні, ввімкненому у коло емітера, також збільшуються. При цьому зміни струму колектора пропорційні змінам вхідної напруги, а фази вхідного і вихідного сигналів співпадають.

Через відсутність підсилення і інверсії цей каскад ще називають емітерним повторювачем напруги.

Вхідний опір каскаду з СК значно більший, ніж у схемі з СЕ, і приблизно може бути визначений за формулою

$$R_{вх} \approx (R_1 \parallel R_2) \parallel (R_E \parallel R_H) \cdot (1 + \beta). \quad (1.6)$$

Вихідний опір каскаду з СК становить

$$R_{вих} \approx R_E \parallel r_E, \quad (1.7)$$

де r_E – диференційний опір емітерного переходу, що для біполярних транзисторів складає від одиниць до десятків ом.

Вказані властивості каскаду з СК дозволяють використовувати його у тих випадках, коли необхідно узгодити джерело сигналу, що має великий внутрішній опір, з низькоомним навантаженням. При цьому забезпечується також підсилення сигналу за потужністю за рахунок підсилення каскадом з СК струму.

6.3. Будова і принцип дії польових транзисторів

Польовим називається транзистор, керований електричною напругою – полем (на відміну від біполярних транзисторів, у яких процес керування обов'язково супроводжується протіканням струму у колі керуючого електрода – бази). Розрізняють польові транзистори з керуючим p - n переходом і з ізолюваним затвором.

На рисунку 1.14, а наведено конструкцію польового транзистора з керуючим p - n переходом.

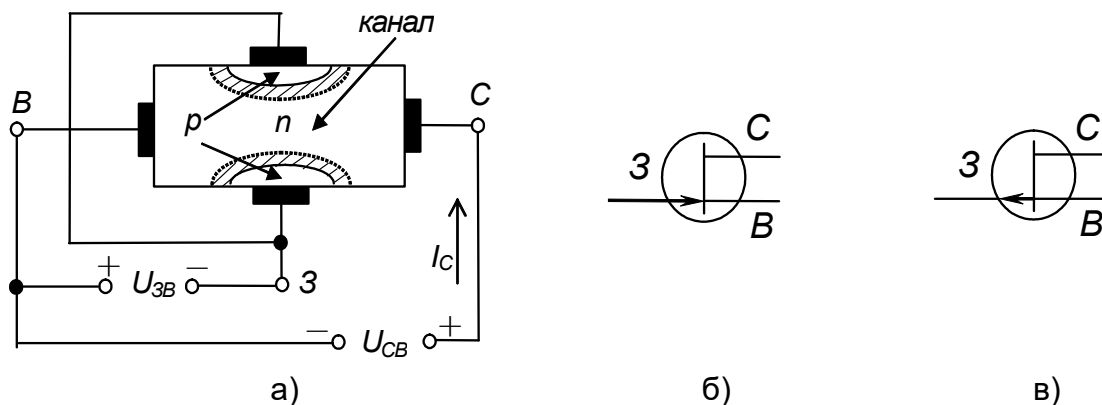


Рисунок 1.14 – Структура та умовне позначення ПТ з керуючим p - n переходом з каналом n -типу (а і б) та умовне позначення ПТ з каналом p -типу (в)

Цей транзистор являє собою напівпровідникову пластинку з провідністю, наприклад, n -типу, на верхній і нижній гранях якої створюються шари з провідністю p -типу. Ці шари електрично з'єднують між собою, утворюючи єдиний електрод, що називається затвором (3).

Шар з провідністю n -типу, що розташований між шарами з провідністю p -типу, називається каналом.

Електрична ізоляція між каналом і затвором здійснюється за допомогою p - n переходів, що утворюються на межі напівпровідників з різною провідністю (використовується та властивість зони p - n переходу, що її опір безкінечний з-за відсутності у ній вільних носіїв заряду).

На торці напівпровідникової пластинки (каналу) наносять омичні контакти, що утворюють два інших електроди, до яких підмикається

джерело живлення і навантаження. Контакт, до якого підмикається негативний полюс джерела, називається витком (В), а контакт, до якого підмикається позитивний полюс, стоком (С).

Основні носії заряду (у даному випадку електрони) рухаються від витку до стоку (тече струм) через канал, поперечний переріз якого регулюється негативною відносно витку напругою на затворі $U_{ЗВ}$, що зміщує p - n переходи у зворотному напрямку (розширюючи зони непровідності). Звуження каналу веде до збільшення його опору і зменшення значення струму, що тече через канал.

За напруги між стоком і витком $U_{СВ} = 0$ стінки каналу є еквіпотенціальними поверхнями. При деякому $U_{ЗВ} = U_{ЗВ0}$, названому напругою відтинання, p - n переходи змикаються за всією довжиною каналу. У результаті стік і витік виявляються ізольованими один від одного. Значення напруги відтинання залежить від концентрації домішок у каналі і його розмірів.

У робочому режимі ($U_{СВ} > 0$) поверхні каналу не є еквіпотенціальними, бо струм, що протікає через канал, створює падіння напруги, яка змінює ступінь зворотного зміщення p - n переходів за довжиною каналу. Біля витку напруга зсуву p - n переходів дорівнює $U_{ЗВ}$, а біля стоку ($U_{ЗВ} + U_{СВ}$).

Отже, перетин каналу буде змінним (зменшується від витку до стоку). Опір каналу при цьому носить нелінійний характер, тому і залежність $I_C = f(U_{СВ})$ також буде нелінійною. З підвищенням $U_{СВ}$ напруга на p - n переходах досягає значення напруги відтинання $U_{ЗВ0} = (U_{ЗВ} + U_{СВ})$ і вони поблизу стоку майже змикаються. При цьому диференційний опір каналу різко зростає і подальше збільшення напруги $U_{СВ}$ не призводить до збільшення струму I_C (точка **a** на рис. 1.15). Тобто відбудеться насичення струму стоку (завдяки дії внутрішньої системи автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком).

Напруга $U_{СВН} = (U_{ЗВ0} - U_{ЗВ})$ називається напругою насичення. Її значення зі зменшенням напруги $U_{ЗВ}$ зростає, як видно з стокових (вихідних) ВАХ транзистора, наведених на рисунку 1.15.

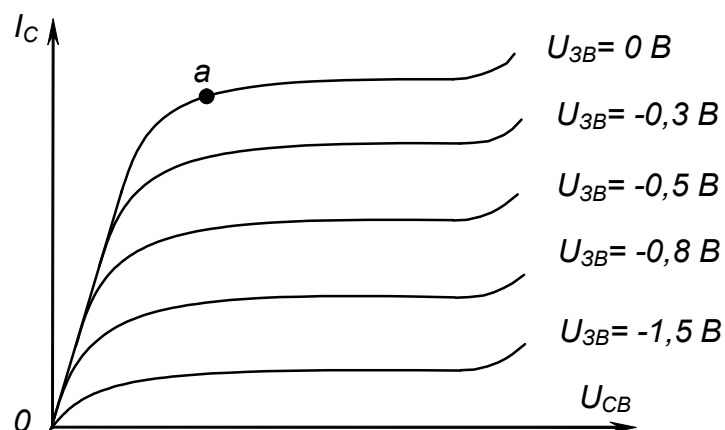


Рисунок 1.15 – Стокові ВАХ ПТ з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Змінюючи напругу на затворі U_{3B} за фіксованої напруги U_{CB} , також можна керувати шириною каналу, а отже, значенням струму I_C , що видно зі стік-затворних ВАХ транзистора $I_C = f(U_{3B})$, наведених на рисунку 1.16.

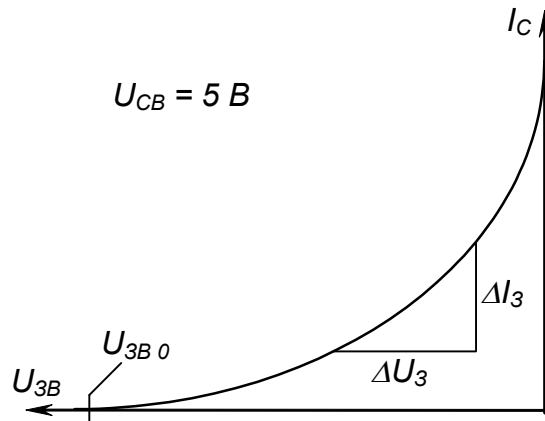
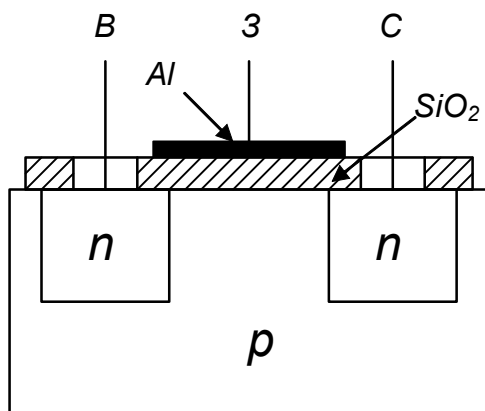


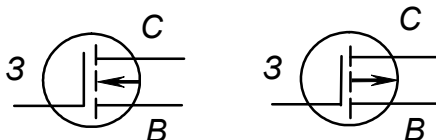
Рисунок 1.16 – Стік-затворна ВАХ ПТ з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Більш широке застосування, особливо у складі ІМС, знаходять польові транзистори з ізольованим затвором, виконані за структурою метал-діелектрик (окисел)-напівпровідник – МДН (МОН)-транзистори.

Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом n -типу показана на рисунку 1.17 а, а умовне зображення – на рисунку 1.17, б, в.



а)



б)

в)

Рис. 1.17 – Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом n -типу (а) і умовні позначення таких транзисторів з каналами n -типу (б) та p -типу (в)

При негативній чи рівній нулю напрузі U_{3B} струм стоку I_C дорівнює нулю, бо обидва p - n переходи транзистора ввімкнені зустрічно.

За позитивної напруги U_{3B} поверхня шару p -типу на межі напівпровідника і діелектрика збагачується електронами, що притягаються до позитивного електроду з глибини пластинки (знаходяться там за рахунок теплової генерації пар носіїв заряду). Виникає явище інверсії напівпровідника – тонкий шар n -типу утворюється на поверхні напівпровідника p -типу.

Таким чином обидві зони n -типу (витік і стік) виявляються електрично з'єднаними – утворюється наведений полем (індукований) канал, що має підвищену провідність і через який протікає струм.

Важливим параметрами польових транзисторів є крутизна стокової характеристики S і опір стоку r_C , що визначаються за ВАХ:

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_C = \text{const}} ; \quad (1.8)$$

$$r_C = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_{3B} = \text{const}} . \quad (1.9)$$

Польові транзистори знаходять широке застосування в пристроях промислової електроніки, що зумовлено їхніми високими входними опорами (до $10^{14} - 10^{17}$ Ом), малим рівнем шумів та ін.

6.4. Підсилювальні каскади на польових транзисторах

Принципи побудови підсилювальних каскадів на польових транзисторах ті самі, що і каскадів на біполярних транзисторах. Особливість полягає у тім, що польовий транзистор керується напругою, а не струмом. З цієї причини завдання режиму спокою в каскадах на польових транзисторах здійснюється подачею у вхідне коло каскаду постійної напруги відповідного значення і полярності.

Польові транзистори так само, як і біполярні, мають три схеми вмикання. Відповідно до назв спільних електродів розрізняють каскади зі спільним стоком (СС), спільним витоком (СВ) та спільним затвором (СЗ).

Підсилювальний каскад з СВ на польовому транзисторі з керуючим *p-n* переходом і каналом *n*-типу зображений на рисунку 1.18.

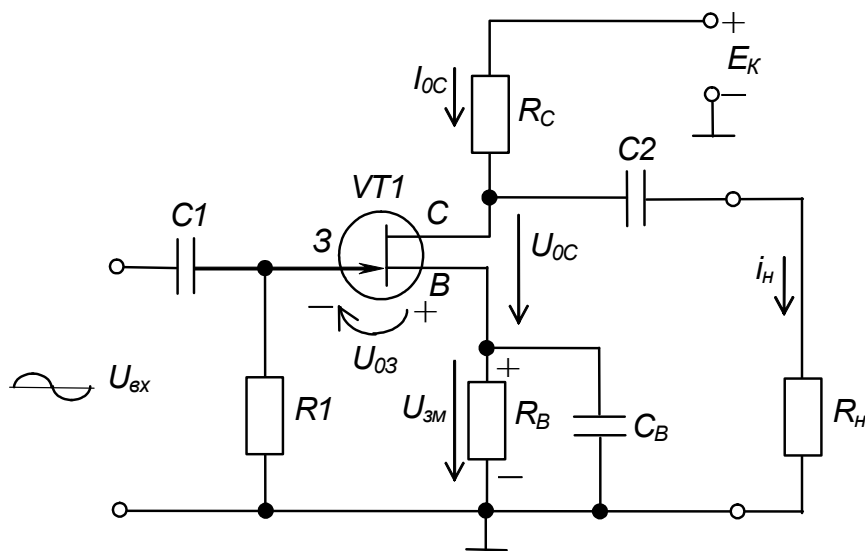


Рисунок 1.18 – Підсилювальний каскад з СВ на польовому транзисторі з керуючим *p-n* переходом і каналом *n*-типу

Елементи R_I , R_C , R_B задають режим спокою каскаду.

Зверніть увагу: оскільки польові транзистори з керуючим *p-n* переходом за відсутності сигналу керування максимально відкриті, то зміщення транзистора забезпечується резистором R_B (необхідне значення

напруги U_{03B} дорівнює U_{3M}) – автоматичне зміщення. Резистор R_1 призначений для з'єднання затвору транзистора з нижнім виводом R_B і запобігання при цьому закорочування кола керування транзистора (з'єднання його затвору з нульовою точкою схеми). Опір резистора R_1 вибирають якомога більшим, щоб забезпечити великий вхідний опір каскаду.

Резистор R_B також створює негативний зворотний зв'язок за постійним струмом, що слугує для стабілізації режиму спокою каскаду при зміні температури і розкиді параметрів транзистора. Конденсатор C_B призначений для виключення негативного зворотного зв'язку за змінним струмом (за підсилюваним сигналом).

Розділяючий конденсатор C_1 забезпечує зв'язок каскаду з джерелом вхідного сигналу напруги змінного струму. Навантаження підмикається через розділяючий конденсатор C_2 до стоку транзистора.

Каскад з СВ, так само як і каскад з СЕ на біполярному транзисторі, здійснює зсув фази підсилюваного сигналу на 180° (інвертує вхідний сигнал).

Схема підсилювального каскаду з СС (витокового повторювача) зображена на рис. 1.19.

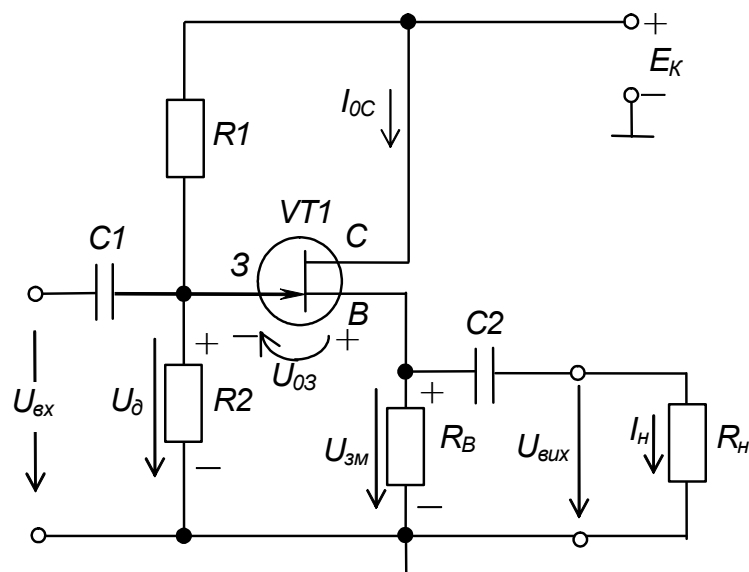


Рисунок 1.19 – Підсилювальний каскад з СС на польовому транзисторі з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Будова каскадів на польових транзисторах з ізольованим затвором аналогічна будові каскадів на біполярних транзисторах.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип роботи біполярного транзистора. Нарисуйте умовні позначення біполярних транзисторів різного типу.
2. Поясніть принцип дії польового транзистора з керуючим р-п переходом.
3. Поясніть принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором.
4. За заданими викладачем значеннями E_k і R_k на сім'ї вихідних характеристик біполярного транзистора побудуйте лінію навантаження за постійним струмом і вкажіть режими роботи транзистора.
5. За динамічною характеристикою підсилюючого каскаду з СЕ поясніть режими його роботи.
6. Нарисуйте схему підсилювального каскаду з СЕ та поясніть призначення елементів.
7. Нарисуйте схему підсилювального каскаду з СК та поясніть призначення елементів.
8. Поясніть зміну фази вихідного сигналу відносно вхідного у каскаді з СЕ і відсутність такого ефекту у каскаді з СК.
9. Поясніть вплив опору навантаження на значення вихідної напруги каскадів з СЕ і з СК.
10. Поясніть ефект підсилення транзистора.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

1 Мета роботи

1. Вивчення параметрів і характеристик багатокаскадних підсилювачів змінного струму на біполярних транзисторах.
2. Дослідження впливу негативних зворотних зв'язків (НЗЗ) і ємності конденсаторів зв'язку на параметри і характеристики підсилювачів.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 2, 4.
2. Мультиметр ВР11.
3. Генератор сигналів ГЗ-34.
4. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Дослідити властивості одиночного підсилюючого каскаду на біполярних транзисторах без НЗЗ і з НЗЗ за змінним струмом.
2. Дослідити властивості двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах без НЗЗ і з комбінованим НЗЗ за різних значень ємності конденсаторів зв'язку.

4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомтесь з робочим місцем, устаткуванням і приладами.
- 4.2 Увімкніть вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановіть у ліве положення.
- 4.3 Дослідження властивостей
одиночного підсилювального каскаду на біполярних транзисторах
- 4.3.1 Дослідіть одиночний підсилювальний каскад з СЕ у режимі класу А за допомогою схеми, зображеної на рисунку 2.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).
Задайте частоту вхідного сигналу підсилювача рівною 1000 Гц, для чого:
 - 1) підімкніть вихід генератора сигналів ГЗ-34 до входу підсилювача (до клем XI і \perp);
 - 2) перемикач $SA3$ встановіть у натиснуте положення – до виходу першого каскаду підсилювача підімкнеться навантаження R_5 (світиться сигнальна лампа I);

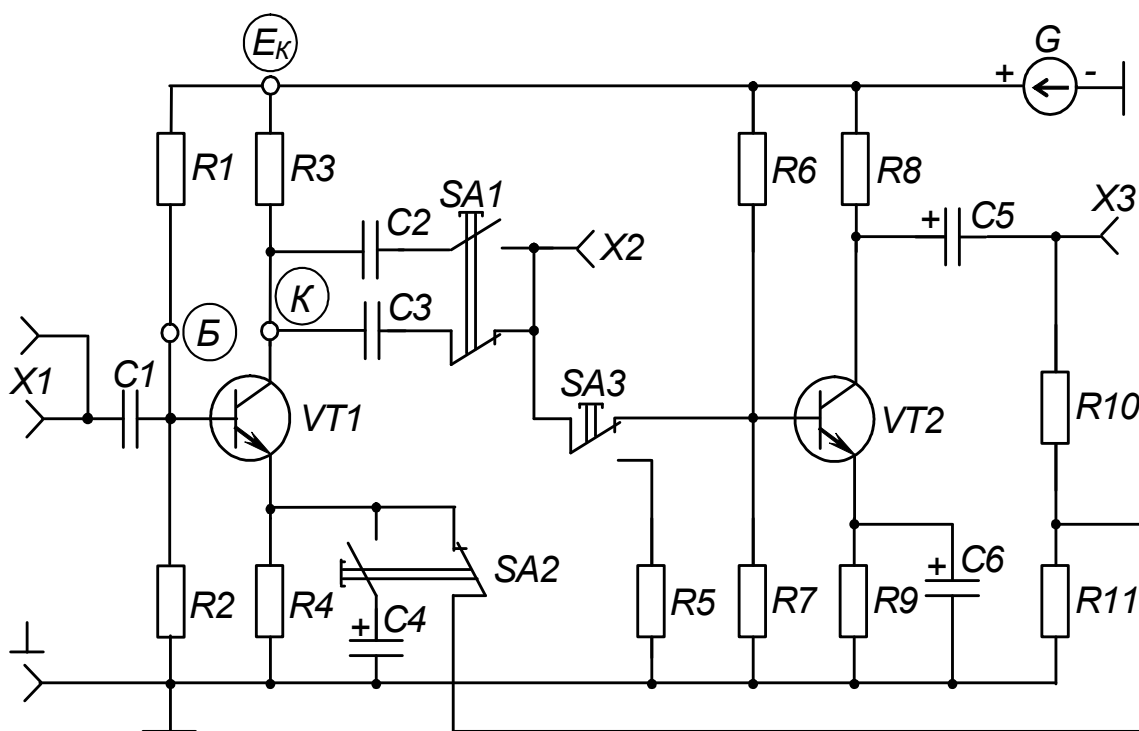


Рисунок 2.1 – Схема для дослідження підсилювачів на біполярних транзисторах

3) перемикач *SA1* встановить у ненатиснуте положення (світиться лампа *C3*), а *SA2* – у натиснуте (відключається НЗЗ);

4) встановить межу вимірювання мультиметра «*V~*», «2» і підімкнить його до виходу першого каскаду підсилювача (клеми *X2* і \perp);

5) встановить на світній шкалі генератора сигналів межу «*100 mV*, *300 mV*, *1V*, *0 dB*»; перемикач *Пределы шкал. Ослабление* встановить у положення «*ATT.*»; ручку *Рег. выхода* встановить у граничне ліве положення; перемикач масштабу частоти «*x1*, *x10*, *x100*» встановить у положення «*x10*»; на шкалі частоти ручкою плавного регулювання частоти генератора виставить значення «*100*».

4.3.2 Зніміть амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ однокаскадного підсилювача без НЗЗ, для чого, обертаючи за годинниковою стрілкою ручку генератора *Рег. выхода*, задавайте необхідні значення вхідної напруги підсилювача за вольтметром генератора (переводячи в міру необхідності перемикач світної шкали генератора у наступні положення за годинниковою стрілкою) і фіксуйте відповідні значення вихідної напруги підсилювача за мультиметром.

Результати вимірів занесіть у таблицю 2.1.

4.3.3 Зніміть амплітудну характеристику однокаскадного підсилювача з НЗЗ за струмом, для чого перемикач *SA2* встановить у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа «*OOC*»).

Далі методика виконання та ж, що й у пп. 4.3.2.

4.3.4 Зніміть осцилограми роботи одиночного підсилюючого каскаду за наявності вхідного сигналу і у режимі спокою (без вхідного сигналу).

Таблиця 2.1 – Результати зняття даних для побудови амплітудної характеристики за $f_{\text{вх}} = 1000$ Гц

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$		10	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	Вид підсилювача
$U_{\text{вих}}, \text{ В}$	без НЗЗ													Однокаскадний
	з НЗЗ													
	без НЗЗ													Двокаскадний
	з НЗЗ													

4.3.5 Задайте значення напруги вхідного сигналу підсилювача рівним 100 мВ (відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.2).

4.3.6 Підімкніть вимірювальний кабель першого каналу осцилографа до клем $X1$ і \perp та зарисуйте осцилограму вхідної напруги каскаду $u_{\text{вх}}$.

4.3.7 Підімкніть вимірювальний кабель другого каналу осцилографа нульовим провідником до клем \perp . Сигнальний провідник підмикати по черзі до клем (B) , (K) та $X2$ і, керуючись даними рисунка 1.12, зарисовуйте осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора $VT1$ і на навантаженні каскаду за наявності вхідного сигналу: u_B , u_K та $u_{\text{вих}}$ відповідно, та за відсутності вхідного сигналу (для чого треба відімкнути генератор від клем $X1$): U_{0B} та U_{0K} . Також зарисуйте осцилограму напруги на клемі (E_K) .

Збільшіть значення вхідної напруги підсилювача до появи помітних викривлень форми вихідного сигналу. Зарисовуйте осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора $VT1$ і на навантаженні каскаду: u_B , u_K та $u_{\text{вих}}$.

При виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлюйте у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення.

4.4. Дослідження властивостей

двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах

4.4.1 Дослідження виконуйте за методикою, викладеною у пп. 4.3.1, тільки перемикач $S43$ необхідно встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа «2»), а мультиметр підімкнути до виходу другого каскаду – клем $X3$ і \perp .

4.4.2 Зніміть амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача без НЗЗ за методикою пп. 4.3.2.

4.4.3 Зніміть амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача з комбінованою НЗЗ (за струмом і за напругою) за методикою пп. 4.3.3.

4.4.4 Зніміть амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) підсилювача $U_{вих} = f(U_{вх})$:

1) без НЗЗ (SA2 у натиснутому положенні) і при ємності конденсатора зв'язку $C_p = C_2 = 0,5$ мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

2) без НЗЗ і при ємності $C_p = C_3 = 20$ мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні);

3) з НЗЗ (SA2 у ненатиснутому положенні) і при $C_p = C_2 = 0,5$ мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

4) з НЗЗ і при $C_p = C_3 = 20$ мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні).

Значення напруги вхідного сигналу підсилювача Ручкою *Рег. вихода* генератора задайте рівним 50 мВ (або 70, 100 – на вибір) згідно до методики, викладеної у пп. 4.3.1.

Необхідні значення частоти вхідного сигналу підсилювача задавайте ручкою плавного регулювання частоти генератора за шкалою і за допомогою перемикача масштабу частоти «x1, x10, x100».

Результати вимірів занесіть у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати зняття даних для побудови АЧХ за $U_{вх} = \text{const}$

$f_{вх}$, Гц			50	100	200	500	10^3	2 $\times 10^3$	5 $\times 10^3$	10 $\times 10^3$	15 $\times 10^3$	20 $\times 10^3$	Вид підсилювача
$U_{вих}$, В	без НЗЗ	C2*)											Двокаскабдний
		C3*)											
	з НЗЗ	C2											
		C3											

4.5 Вимкніть прилади і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 2.1 у одній системі координат побудуйте графіки амплітудних характеристик. Зробіть висновки про характер кривих.

5.2 За амплітудними характеристиками визначте динамічний діапазон і коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$ кожного підсилювача. Зробіть висновок про вплив НЗЗ на ці параметри.

5.3 Осцилограми роботи однокаскадного підсилювального каскаду з СЕ у режимі класу А розмістіть одну під одною згідно з рисунку 2.4.

5.4 За даними таблиці 2.2 розрахуйте значення K_U і занесіть у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку значень коефіцієнта підсилення для побудови АЧХ

f_{ex} , Гц			50	100	200	500	10^3	2×10^3	5×10^3	10×10^3	15×10^3	20×10^3	Вид підсилювача
$K_U = U_{eux} / U_{ex}$	без НЗЗ	$C_2^*)$											Двокаскадний
		$C_3^*)$											
	з НЗЗ	C_2											
		C_3											

5.5 За даними табл. 2.2 побудуйте у одній системі координат АЧХ підсилювачів $K_U = f(\lg f_{ex})$. Зробіть висновки про характер кривих.

5.6 За АЧХ визначте смугу пропускання кожного підсилювача. Зробіть висновок про вплив НЗЗ і ємності конденсатора зв'язку на характеристики підсилювача.

6 Пояснення до роботи

Підсилювач – це пристрій, у якому порівняно малопотужний вхідний сигнал керує передачею значно більшої потужності від джерела живлення в навантаження. Збільшення потужності вхідного сигналу для лінійного підсилювача повинне забезпечуватися без викривлення форми і змін частотного складу.

З транзисторних підсилювачів найбільше поширення знайшли переважно виконані за схемою з СЕ. У наш час поширені підсилювачі на ІМС.

Найпростіший підсилюючий вузол називають підсилювальним каскадом.

Найважливішим параметром підсилювача є коефіцієнт підсилення – відношення напруги (струму, потужності) на виході підсилювача до напруги (струму, потужності) на вході (відповідно, коефіцієнт підсилення за напругою K_U , за струмом K_I , за потужністю K_P). Він показує ступінь збільшення вихідного сигналу у порівнянні з вхідним. У ідеального лінійного підсилювача коефіцієнт підсилення повинен мати постійне значення незалежно від значень напруги і частоти вхідного сигналу.

Якщо підсилення одного каскаду недостатньо, застосовують багатокаскадні підсилювачі, що являють собою послідовне з'єднання декількох каскадів.

Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення ввімкнутих послідовно каскадів.

Основними характеристиками підсилювача є амплітудна й амплітудно-частотна характеристики.

Амплітудна характеристика показує залежність $U_{вих} = f(U_{вх})$ на деякій постійній частоті.

У реального підсилювача ця характеристика має вигляд, наведений на рисунку 2.2.

У робочому діапазоні значень напруги від $U_{вх \min}$ до $U_{вх \max}$ характеристика лінійна.

У зоні від 0 до $U_{вх \min}$ напруга на виході визначається власними шумами підсилювача, викликаними, наприклад, пульсаціями напруги живлення, неоднорідністю структури елементів. Шуми глушать корисний сигнал.

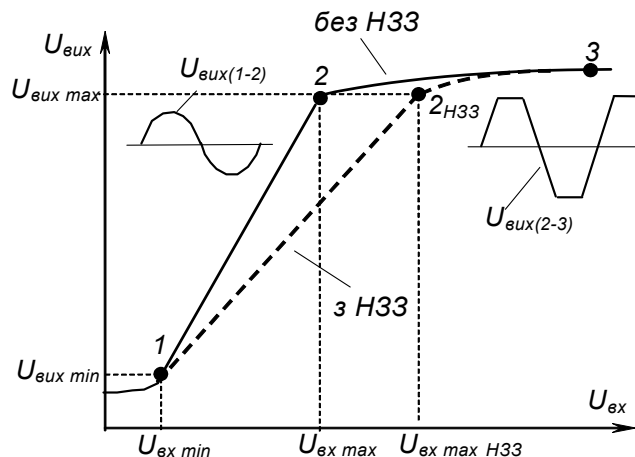


Рисунок 2.2 - Амплітудна характеристика підсилювача $U_{вих} = f(U_{вх})$

При вхідних напругах більших за $U_{вх \max}$ пропорційність між $U_{вих}$ і $U_{вх}$ порушується через порушення пропорційної залежності між вхідним і вихідним струмами транзистора (транзистор починає заходити у режими насичення та відтинання). При цьому виникають викривлення вихідного сигналу, що називаються нелінійними. Підсилювач входить у режим насичення, коли вихідна напруга не залежить від вхідної. Зауважимо, що необхідно розрізняти режими насичення транзистора (за постійним струмом) і режим насичення підсилювача (за змінним струмом).

Здатність підсилювача підсилювати мінімальне і максимальне значення напруги з дотриманням їхньої пропорційної залежності визначається динамічним діапазоном:

$$D = \frac{U_{вх \max}}{U_{вх \min}}. \quad (2.1)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) показує залежність модуля коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти. Тобто показує, як підсилюються гармонійні складові складного сигналу. Вид АЧХ наведено на рисунку 2.3.

Неоднаковість підсилення гармонійних складових веде до частотних викривлень, через які форма складного вихідного сигналу відрізняється від форми вхідного.

Причиною частотних викривлень є елементи підсилювача, опір яких залежить від частоти (ємності, індуктивності). Як зосереджені – елементи схеми (на низьких частотах), так і розосереджені – паразитні (на вищих частотах).

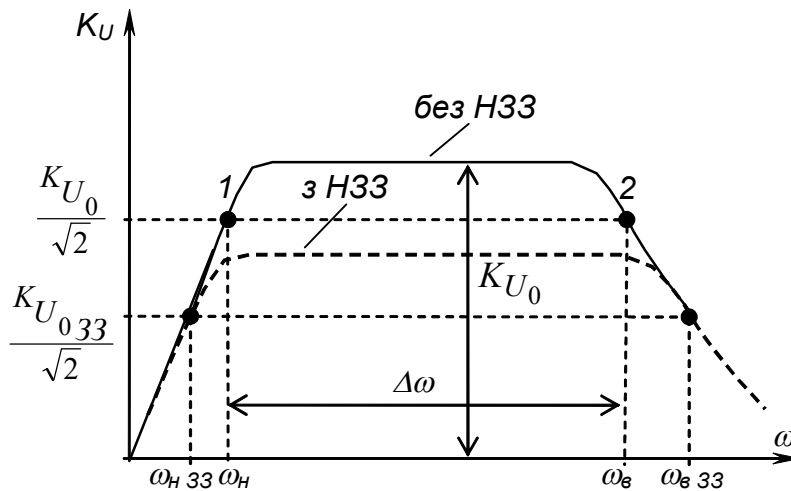


Рисунок 2.3 – АЧХ підсилювача з резистивно-ємнісними зв'язками

За АЧХ можна визначити смугу пропускання підсилювача

$$\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}, \quad (2.2)$$

що являє собою діапазон частот, у якому коефіцієнт підсилення не відрізняється від максимального K_{U0} більш, ніж у $\sqrt{2}$ раз:

$$K_U \geq \frac{K_{U0}}{\sqrt{2}}. \quad (2.3)$$

Для підсилення сигналів змінного струму застосовують підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками. Схему такого двокаскадного підсилювача наведено на рисунку 2.4.

Наявність конденсаторів у якості елементів міжкаскадного зв'язку (C_2), а також зв'язку з джерелом сигналу (C_1) і навантаженням (C_3) робить режими роботи каскадів за постійним струмом взаємонезалежними, а також виключає їхній вплив на роботу джерела сигналу і навантаження.

У той же час наявність цих конденсаторів веде до зниження коефіцієнта підсилення на нижчих частотах через те, що опір конденсаторів $X_C = 1/2\pi fC$ зі зниженням частоти збільшується, а значить зростає падіння напруги на них і, у результаті, менша частка змінної напруги передається у навантаження (або наступний каскад). В області середніх і вищих частот вплив цих конденсаторів незначний.

На вищих частотах паразитні ємності (ємності монтажу і міжелектродні ємності у транзисторах та інших елементах) призводять до шунтування корисного сигналу (замикання частини струму корисного сигналу на загальний провід), а також до виникнення паразитних НЗЗ (наприклад, через ємність колектор-база транзисторів).

Все це призводить до зниження коефіцієнта підсилення. Тут також позначається залежність коефіцієнта підсилення транзисторів за струмом β

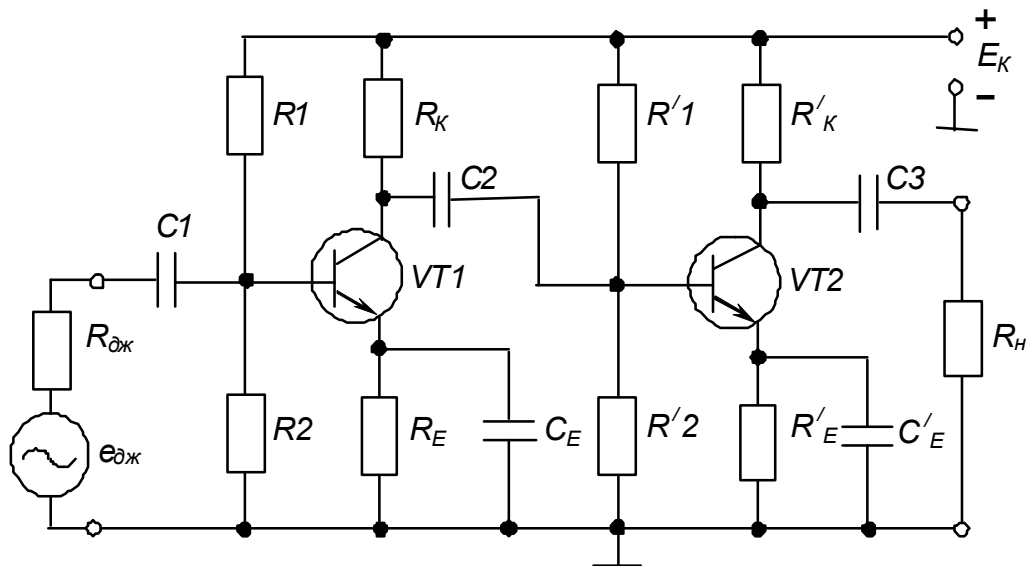


Рисунок 2.4 – Двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісними зв'язками

від частоти. Отже необхідно вибирати транзистори з граничною частотою підсилення, що значно перевищує верхню частоту сигналу.

Каскад підсилювача, як правило, має кола, за допомогою яких частина енергії сигналу передається з виходу каскаду на його вхід або на вхід одного з попередніх каскадів – кола зворотного зв'язку.

Ми вже знайомі з НЗЗ за постійним струмом, що застосовується для температурної стабілізації режиму спокою підсилюючого каскаду.

До речі, наявність конденсаторів C_3 і C_4 , що шунтують резистори R_4 і R_8 , на нижчих частотах веде до виникнення НЗЗ за змінним струмом і відповідно до зниження коефіцієнта підсилення.

У роботі досліджується НЗЗ за змінним струмом, що забезпечується відмиканням конденсатора C_4 (див. рис. 2.1), і за напругою – подачею частини вихідної напруги з ділянки R_{10} , R_{11} у коло емітера $VT1$ у протифазі до вхідної напруги (див. рис. 2.1).

НЗЗ веде до зниження коефіцієнта підсилення підсилювача:

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 + K_U \cdot X}, \quad (2.4)$$

де $X = U_{33} / U_{вих}$ – коефіцієнт передачі кола НЗЗ, що показує, яка частина вихідної напруги подається на вхід підсилювача.

Введення НЗЗ, знижуючи коефіцієнт підсилення, у той же час збільшує динамічний і частотний діапазони підсилювача (що видно з його амплітудних і амплітудно-частотних характеристик) та покращує інші його параметри. Так, наприклад, у $(1 + K_U X)$ раз збільшується вхідний і зменшується вихідний опори підсилювача.

При великому значенні K_U і глибокому НЗЗ, як впливає з (2.7), якщо $K_U \rightarrow \infty$, K_{U33} наближається до значення $1/X$. Тобто він не залежить

від фактичного значення K_U і його змін з коливаннями температури та під дією інших дестабілізуючих факторів. Отже НЗЗ підвищує стабільність роботи підсилювача.

Наявність позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ), коли сигнал зворотного зв'язку знаходиться у фазі з вхідним, навпроти, погіршує характеристики підсилювача. Виникнення паразитних ПЗЗ через загальні кола живлення каскадів, паразитні ємності й індуктивності може також призводити до самозбудження підсилювача, коли він переходить у режим генерації сигналу деякої частоти.

Виконання підсилювачів у вигляді ІМС, поряд із зменшенням габаритів, значно підвищує їхню якість у порівнянні з підсилювачами на дискретних компонентах. Зокрема, це відбувається за рахунок значного зниження паразитних зворотних зв'язків. Інтегральна технологія дозволяє істотно поліпшити якість і надійність електронних підсилювачів шляхом забезпечення при їхньому проектуванні великого запасу параметрів: так званої функціональної надлишковості.

Контрольні запитання

- 1. Вкажіть області застосування підсилювачів змінного струму, їхні основні параметри й характеристики.*
- 2. Поясніть причину появи нелінійних викривлень.*
- 3. Вкажіть, у яких режимах працює транзистор підсилювача у його режимах, що відповідають різним ділянкам амплітудної характеристики.*
- 4. Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області нижчих частот.*
- 5. Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області вищих частот.*
- 6. Поясніть, що таке динамічний діапазон і смуга пропускання підсилювача та як впливає НЗЗ на ці параметри.*
- 7. Поясніть призначення конденсаторів міжкаскадного зв'язку і їхній вплив на АЧХ підсилювача.*
- 8. Поясніть, як забезпечується температурна стабілізація режиму спокою досліджуваних підсилюючих каскадів і як впливають елементи температурної стабілізації на АЧХ.*
- 9. Наведіть схему двокаскадного підсилювача низької частоти, поясніть призначення елементів, покажіть шлях протікання струмів (постійних і змінних).*
- 10. Поясніть призначення НЗЗ, що застосовані у досліджуваних підсилювачах.*
- 11. Вкажіть переваги застосування підсилювачів у інтегральному виконанні (у вигляді ІМС).*

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

1 Мета роботи

1. Дослідження властивостей і характеристик операційних підсилювачів (ОП).
2. Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 1, 3.
2. Вольтметр цифровий В7-27.
3. Мультиметр ВР-11.
4. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Дослідити властивості і передатні характеристики ОП.
2. Дослідити будову і роботу типових аналогових пристроїв на ОП: інвертувального підсилювача, неінвертувального підсилювача, підсилювача-віднімача, інвертувального інтегратора, диференціатора.

4 Порядок виконання роботи

4.1 Ознайомтесь з робочим місцем і приладами.

4.2 Ввімкніть прилади і живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда лабораторного (між мнемосхемами) встановіть у праве положення.

4.3 Дослідження властивостей і характеристик ОП

4.3.1 Дослідіть властивості і характеристики ОП за допомогою схеми, наведеної на рисунку 3.1 (верхня мнемосхема на правій половині стенда лабораторного).

До клем $X1$ і \perp підімкніть цифровий вольтметр у режимі вимірювання напруги постійного струму на межі « -100 mV », а до клем $X2$ і \perp – мультиметр у тому ж режимі на межі вимірювання « -20 V ».

4.3.2 Зніміть передатну характеристику ОП для інвертувального вмикання, $U_{вих} = f(U_{вх})$, для чого перемикач $SA1$ встановіть у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа «*Инв. вкл.*»).

Обертаючи ручку резистора R_I за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавайте необхідні значення $U_{вх}$ за цифровим вольтметром і фіксуйте за мультиметром відповідні значення $U_{вих}$. Стежте за

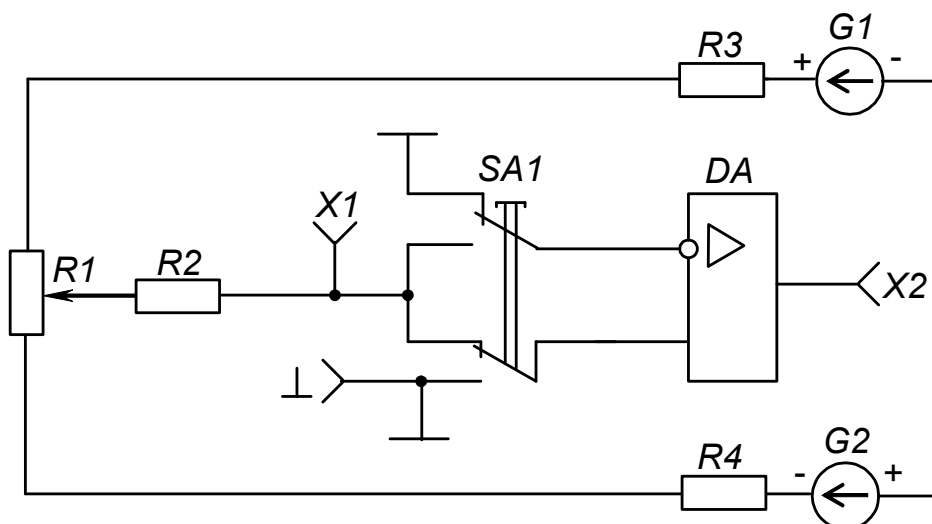


Рисунок 3.1 – Схема для дослідження ОП

правильністю полярності подаваної на вхід мультиметра напруги.

Результати вимірів занесіть в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати зняття передатної характеристики ОП

$U_{вх}, \text{ мВ}$	-50	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	Вмикання ОП
$U_{вих}, \text{ В}$											інв.
											неінв.

Закінчення таблиці 3.1

$U_{вх}, \text{ мВ}$	5	10	15	20	25	30	35	40	50	Вмикання ОП
$U_{вих}, \text{ В}$										інв.
										неінв.

4.3.3 Зніміть передатну характеристику ОП для неінвертувального вмикання, для чого перемикач *SA1* встановіть у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа «Неінв. вкл.»). Далі методика аналогічна наведених у пп. 4.3.1.1.

4.4 Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

4.4.1 Дослідіть пристрої на ОП за допомогою схеми, наведеної на рисунку 3.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

4.4.2 Зберіть схему інвертувального підсилювача, для чого перемикачі *SA2*, *SA6* і *SA7* встановіть у натиснуте положення, а інші у ненатиснуте.

Задайте цифровому вольтметру режим вимірювання напруги змінного струму на межі « $\sim 100 \text{ мВ}$ » (вхід « $\sim 300 \text{ В}$ », вимірювальний кабель екранований) і підмкніть його до клем *X2* і \perp . Зафіксуйте результат

вимірювання входної напруги підсилювача.

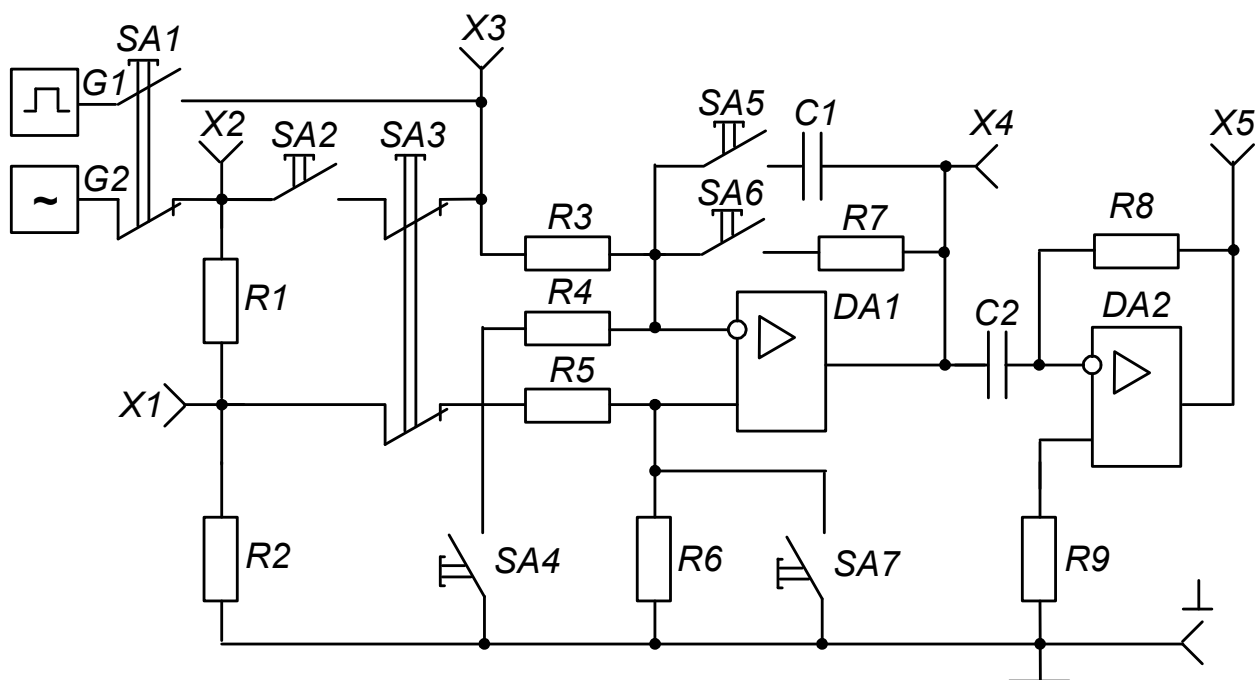


Рисунок 3.2 – Схема для дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

Задайте межу вимірювання вольтметра « $\sim 10\text{ V}$ », підімкніть його до клем $X4$ і \perp . Зафіксуйте результат вимірювання вихідної напруги підсилювача. Визначте коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = -\frac{U_{вих}}{U_{вх}}$$

Відімкніть вольтметр від досліджуваної схеми.

Підімкніть кабель першого каналу осцилографа до клем $X2$ і \perp , а другого – до клем $X4$ і \perp . Органи керування осцилографа встановіть у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення. Зарисуйте осцилограми входної і вихідної напруг підсилювача (зверніть увагу на те, що входна і вихідна напруги інвертуючого підсилювача знаходяться у протифазі).

4.4.3 Зберіть схему неінвертувального підсилювача, для чого перемикачі $SA4$ і $SA6$ встановіть у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте.

Далі повторіть операції за пп. 4.4.2 (зверніть увагу на те, що входна і вихідна напруги неінвертувального підсилювача синфазні).

4.4.4 Зберіть схему підсилювача-віднімача, для чого перемикачі $SA2$ і $SA6$ встановіть у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте. Заміряйте значення входних і вихідних напруг, підмикаючи цифровий вольтметр по черзі до клем: $X1$ і \perp – $U_{вх1}$ (межа вимірювання « $\sim 100\text{ m V}$ »); $X3$ і \perp – $U_{вх2}$ (межа вимірювання та ж сама); $X4$ і \perp – $U_{вих}$ (межа вимірювання « $\sim 10\text{ V}$ »).

Визначте коефіцієнт передачі підсилювача-віднімача

$$N = - \frac{U_{вих}}{U_{ex2} - U_{ex1}}.$$

4.4.5 Зберіть схему інвертувального інтегратора, для чого перемикачі *SA1*, *SA5* і *SA7* встановіть у натиснуте положення, а всі інші – у ненатиснуте.

Підімкніть кабель першого каналу осцилографа до клем *X3* і \perp , а другого – до клем *X4* і \perp .

Зарисуйте осцилограми вхідної напруги (за формою близька до прямокутної) і вихідної (пилкоподібна).

Підімкніть кабель другого каналу осцилографа до клем *X5* і \perp та зарисуйте осцилограму вихідної напруги диференціатора, переконавшись, що за формою вона збігається з вхідною напругою інтегратора.

4.5 Вимкніть прилади і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 3.1 побудуйте передатні характеристики ОП і визначте за ними:

- 1) граничні значення вихідної напруги: $U_{вих\max}^+$; $U_{вих\max}^-$;
- 2) напругу зсуву (зміщення) нуля $U_{зм0}$;
- 3) коефіцієнти підсилення ОП за обома входами: як $K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$.

5.2 За осцилограмами зробіть висновки про співвідношення фаз вхідної і вихідної напруг інвертувального і неінвертувального підсилювачів, інвертувального інтегратора. Визначте постійну інтегрування інтегратора.

6 Пояснення до роботи

ОП – це підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, що мають диференціальний вхід і один вихід. Виконуються ОП, в основному, у виді інтегральних мікросхем. Свою назву вони отримали завдяки своєму первинному застосуванню: для моделювання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах.

Властивості ОП близькі до властивостей ідеального диференціального підсилювача: симетрія входів, підсилення у широкому діапазоні частот, починаючи від постійного струму, нульова напруга на виході за відсутності сигналу на вході, великий коефіцієнт підсилення (в ідеалі – нескінченний), великий вхідний і малий вихідний опори (в ідеалі – нескінченний і рівний нулю, відповідно), великий динамічний діапазон.

Як показано на типовій схемі вмикання на рисунку 3.3, живлення ОП

ДА здійснюється від двох різнополярних джерел з однаковими абсолютними значеннями е.р.с. E_1 і E_2 . До входів ОП прикладається вхідна напруга $U_{вх}$ на фоні синфазної $U_{сф}$. При цьому ОП підсилює лише $U_{вх}$.

При подачі на неінвертувальний вхід нульового потенціалу, підсилювач є інвертувальним – вхідна і вихідна його напруги при цьому мають різні знаки (у випадку гармонійного сигналу вхідна і вихідна напруги знаходяться у протифазі).

При подачі нульового потенціалу на інвертувальний вхід, підсилювач стає неінвертувальним – знаки вхідної і вихідної напруг співпадають (у випадку гармонійного сигналу – вхідна і вихідна напруги синфазні).

Найважливішими характеристиками ОП є передатні характеристики, що являють собою залежність вихідної напруги ОП від вхідної за кожним із входів при нульовій напрузі на іншому. Ці характеристики представляють у вигляді двох кривих, що відносяться відповідно до інвертувального і неінвертувального входів, як показано на рисунку 3.4.

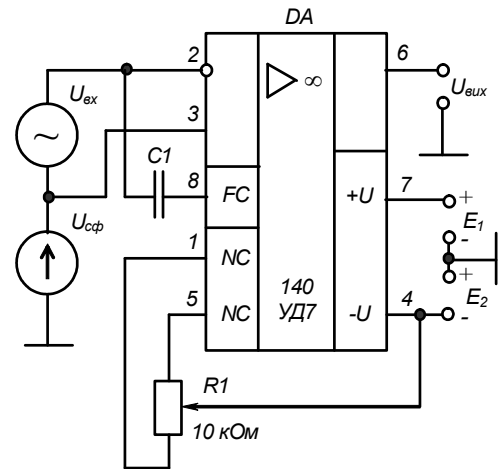


Рисунок 3.3 – Схема вмикання ОП типу 140УД7

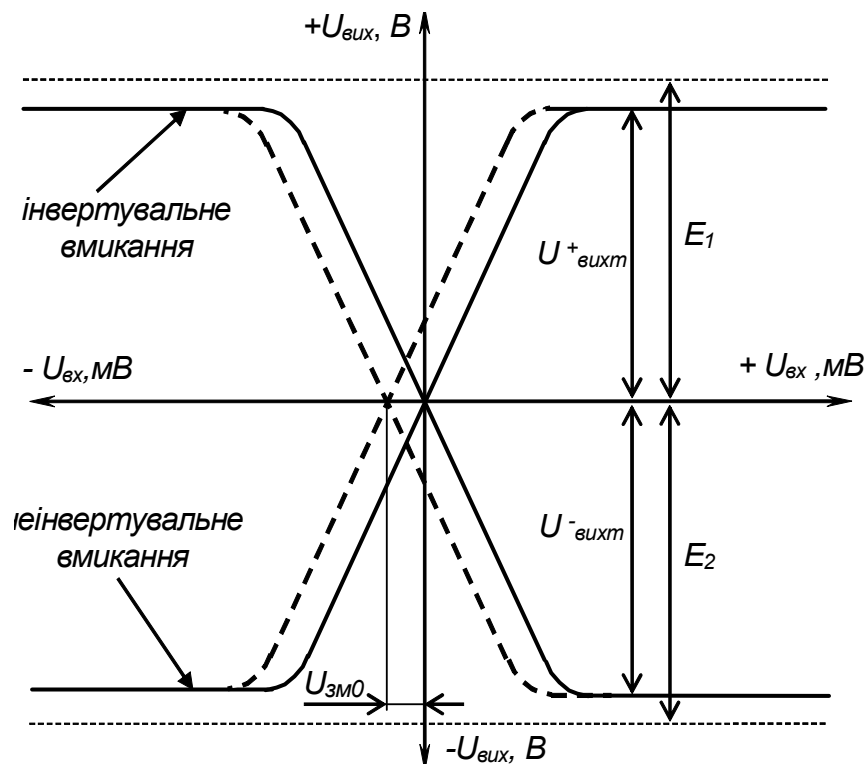


Рисунок 3.4 – Передатні характеристики ОП

За передатною характеристикою можна визначити наступні параметри ОП:

$U_{вих\ max}$ – граничне значення вихідної напруги;

K_1, K_2 – коефіцієнти підсилення за входами ОП ($K_1 \approx K_2 = K_U$);

$U_{зм0}$ – напруга зсуву (зміщення) нуля.

За однакових значень е.р.с. джерел живлення граничні значення напруг $U_{вих}^+, U_{вих}^-$ також однакові і близькі до е.р.с. джерел живлення.

$$\text{Коефіцієнт підсилення ОП } K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}.$$

Його значення залежить від типу ОП, і може складати від декількох тисяч до декількох десятків тисяч і більше.

Напруга зсуву нуля $U_{зм0}$ визначається як напруга, яку необхідно подати на вхід ОП, щоб $U_{вих} = 0$.

Іншими важливими параметрами ОП є вхідний опір, вхідні струми зсуву, різниця і дрейф вхідних струмів зсуву, вихідний опір, частотна смуга пропускання ОП та ін.

Розглянемо деякі типові аналогові пристрої, виконані на ОП.

При аналізі роботи цих пристроїв будемо вважати ОП за ідеальний, тобто:

- 1) $K_U = \infty$ (реально – десятки і сотні тисяч);
- 2) $R_{вх} = \infty$ за кожним входом (реально – сотні кілоом);
- 3) $R_{вих} = 0$ (реально – менш за 100 Ом).

При цьому будемо враховувати, що у ідеального ОП, якщо він працює у лінійному режимі (на пологій частині передатної характеристики), потенціали обох входів однакові. Тобто його $U_{вх} = 0$.

Дійсно, якщо $K_U = \infty$, то за будь-якого значення вихідної напруги $U_{вих}$, виявляється, що вхідна напруга $U_{вх} \Big|_{K_U \rightarrow \infty} = \frac{U_{вих}}{K_U} = 0$.

Отже, маємо: у лінійному режимі ОП так керує зовнішнім НЗЗ, що напруга між його входами дорівнює нулю.

Реально ця напруга трохи відрізняється від нуля, бо K_U все ж таки менший за безкінечність. Однак для багатьох застосувань сучасні ОП

можна вважати за ідеальні. При цьому похибки, зумовлені неврахуванням реальних параметрів, складають доли відсотка.

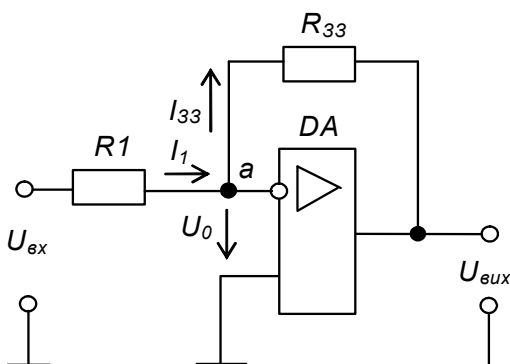


Рисунок 3.5 – Інвертувальний підсилювач на ОП

Інвертувальний підсилювач, схему якого наведено на рисунку 3.5 (джерела живлення і корекції тут не показані), змінює знак вихідної напруги відносно вхідної.

У ОП, охопленого НЗЗ, у лінійному (підсилювальному) режимі різницю напруг між входами вважаємо рівною

нулю: $U_0 = 0$. Виходячи з цього, потенціал інвертувального входу (точка **а**) дорівнює потенціалу неінвертувального, підімкненого до нульової точки. Тоді вхідний струм підсилювача становить

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}. \quad (3.1)$$

Це значить, що джерелом вхідного сигналу цей пристрій сприймається як резистор R_1 – вхідний опір інвертувального підсилювача дорівнює опоріві резистора R_1 .

Оскільки у ОП $R_{\text{вх}} = \infty$, то струм $I_{\text{вх}}$, що втікає в точку **а**, витікати з неї може тільки через R_{33} у вихід ОП і далі в одне з джерел живлення.

Отже
$$I_{\text{вх}} = I_{33}. \quad (3.2)$$

Щоб забезпечити протікання такого струму через R_{33} , на виході ОП повинна бути напруга

$$-U_{\text{вих}} = I_{33} R_{33}. \quad (3.3)$$

З урахуванням виразів (3.1) – (3.3) знайдемо значення коефіцієнта підсилення інвертуючого підсилювача

$$K_{U_{33}} = \frac{-U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{-I_{33} R_{33}}{I_{\text{вх}} R_1} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.4)$$

Схему **неінвертувального підсилювача** наведено на рисунку 3.6.

Виходячи з викладених вище міркувань, при $U_0 = 0$ напруга, що прикладена до R_1 , дорівнює $U_{\text{вх}}$, а через R_1 протікає струм

$$I_{R1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}. \quad (3.5)$$

Це значить, що
$$I_{R1} = I_{33}. \quad (3.6)$$

Отже, щоб забезпечити протікання струму I_{33} через резистори R_1 і R_{33} , на виході ОП повинна бути напруга

$$U_{\text{вих}} = I_{33}(R_1 + R_{33}). \quad (3.7)$$

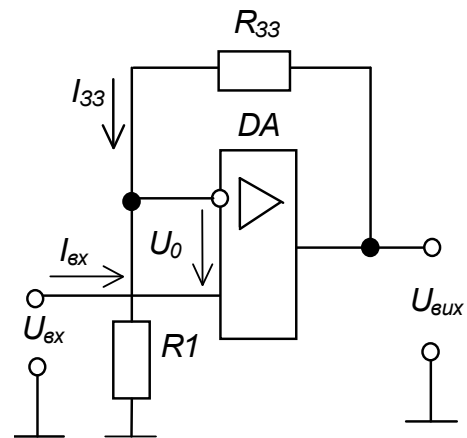


Рисунок 3.6 –
Неінвертувальний
підсилювач на ОП

З урахуванням (3.5) – (3.7) коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача на ОП

$$K_{U33} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{I_{33}(R_1 + R_{33})}{I_{R1}R_1} = \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.8)$$

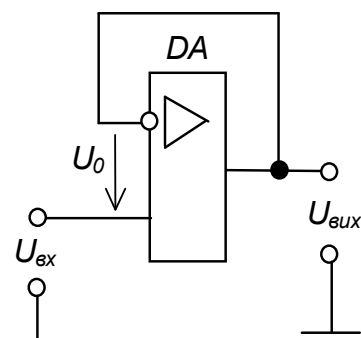


Рисунок 3.7 – Повторювач напруги

Якщо задати $R_{33} = 0$, а $R_1 = \infty$, то одержимо **повторювач напруги**, схему якого наведено на рисунку 3.7. Він має великий вхідний опір і малий вихідний та використовується для узгодження джерел сигналу, що мають великий опір з низькоомними навантаженнями.

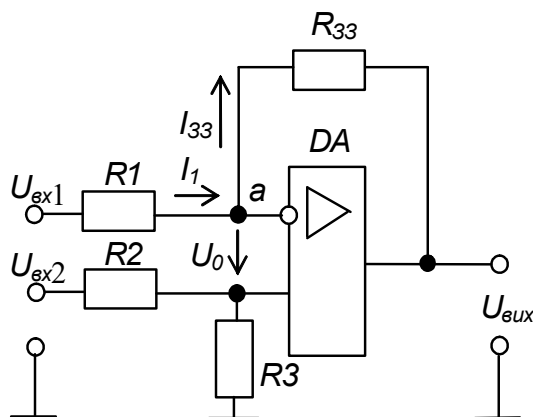


Рисунок 3.8 – Підсилювач-віднімач

Схему **підсилювача-віднімача** наведено на рисунку 3.8.

Якщо у цій схемі прийняти, що $U_{вх1} = 0$ (тобто припустимо, що верхній вхід під'єднано до точки \perp), схема зводиться до неінвертуючого підсилювача (див. рис. 3.6), на вхід якого сигнал $U'_{вх2}$ подається через дільник R_2, R_3 .

$$\text{Тоді } U'_{вх2} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.9)$$

З урахуванням (3.8) одержимо

$$U'_{вих} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right). \quad (3.10)$$

Якщо тепер прийняти $U_{вх2} = 0$ (до точки \perp під'єднано нижній вхід підсилювача), то схема зводиться до інвертувального підсилювача (див. рис. 3.5). Наявність резисторів R_2 і R_3 не впливає на нульовий потенціал неінвертувального входу ОП (маємо вхід, підімкнений до нульової точки через провідник з опором $R_3/R_2 + R_3$).

$$\text{Тоді відповідно до (3.4)} \quad U''_{вих} = -U_{вх1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.11)$$

За одночасної дії обох вхідних сигналів

$$U_{вих} = U'_{вих} + U''_{вих} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right) - U_{вх1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.12)$$

$$\text{Якщо задати} \quad R_1 = R_2 = R; \quad (3.13)$$

$$R_{33} = R_3 = NR, \quad (3.14)$$

$$\text{отримаємо} \quad U_{вих} = N(U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (3.15)$$

Схему **інвертувального інтегратора** на ОП наведено на рисунку 3.9.

Як видно, вона відрізняється від схеми інвертувального підсилювача, (див. рис. 3.5) тим, що замість R_{33} увімкнено конденсатор C .

Згідно з (3.1) і (3.2)

$$i_R = \frac{U_{вх}}{R}; \quad (3.16)$$

$$i_C = i_R. \quad (3.17)$$

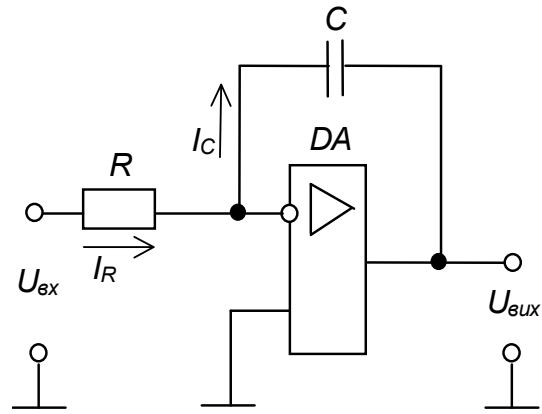


Рисунок 3.9 – Інвертувальний інтегратор

Оскільки конденсатор увімкнено між виходом ОП і точкою **а**, що має нульовий потенціал, то

$$U_{вих} = -U_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} dt, \quad (3.18)$$

де $\frac{1}{RC}$ – постійна інтегрування.

Якщо до входу пристрою прикласти постійну напругу, то

$$i_R = i_C = \frac{U_{вх}}{R} = const. \quad (3.19)$$

Тобто конденсатор заряджається струмом постійного значення, і напруга на ньому змінюється лінійно:

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} U_{вх} \cdot t. \quad (3.20)$$

Це є рівнянням прямої, що починається з нуля.

Отже у даному разі на виході інтегратора маємо напругу, що лінійно змінюється. Така його властивість використовується при побудові генераторів пилоподібної напруги.

Схему диференціатора наведено на рисунку 3.10.

Відомо, що

$$i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.21)$$

Оскільки

$$i_C = i_{33} = -\frac{U_{вих}}{R},$$

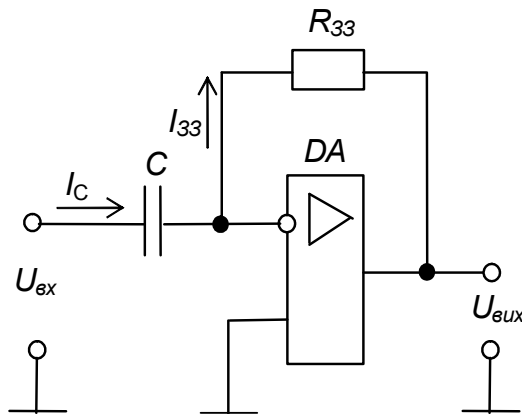


Рисунок 3.10 – Диференціатор

то

$$i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.22)$$

Тоді $U_{вих} = -RC \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.23)$

Якщо вхідна напруга диференціатора змінюється лінійно $\left(\frac{dU_{вх}}{dt} = const \right)$, то згідно з (3.23) вихідна напруга матиме постійне значення.

На закінчення зазначимо, що, при роботі підсилювачів на ОП у лінійному режимі і за наявності глибокого НЗЗ, ОП за своїми параметрами істотно наближається до ідеального, бо різко зростає його вхідний опір і зменшується вихідний.

Перше, наприклад, пояснюється тим, що через малу різницю потенціалів між входами ($U_0 \rightarrow 0$) незначні і вхідні струми.

З іншого боку, з теорії зворотних зв'язків відомо, що якщо коефіцієнт зворотного зв'язку

$$\chi = \frac{U_{33}}{U_{вих}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}, \quad (3.24)$$

то $R_{вх33} = R_{вх}(1 + K_U \chi), \quad (3.25)$

$$R_{вих33} = \frac{R_{вих}}{(1 + K_U)}, \quad (3.26)$$

де $R_{вх33}$ і $R_{вих33}$ – вхідний і вихідний опори підсилювача, охопленого НЗЗ.

Розглянуті схеми на ОП є основою для побудови найрізноманітніших пристроїв аналогової техніки: підсилювачів, суматорів, активних фільтрів, генераторів та ін.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову ОП і вкажіть їхні властивості.
2. Поясніть вид передатних характеристик ОП для різних схем вмикання та як за ними визначити коефіцієнт підсилення ОП і напругу зсуву нуля.
3. Поясніть принцип дії інвертувального підсилювача на ОП.
4. Поясніть принцип дії неінвертвального підсилювача, на ОП.
5. Поясніть принцип дії підсилювача-віднімача на ОП.
6. Поясніть принцип дії інвертвального інтегратора на ОП.
7. Поясніть принцип дії диференціатора на ОП.
8. Як побудувати суматор на ОП?
9. Поясніть, за рахунок чого властивості пристроїв, побудованих на ідеальному ОП, визначаються тільки параметрами елементів зворотного зв'язку?

Лабораторна робота №4
ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ
НА ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ
МІКРОСХЕМАХ (ІМС)

1 Мета роботи

1. Дослідження мультівібраторів на біполярних транзисторах.
2. Дослідження тригерів на ІМС.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 2, 4.
2. Мультиметр ВР11.
3. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Дослідити роботу симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах.
2. Дослідити роботу мультівібратора з відтинаючими діодами.
3. Дослідити роботу тригерів на ІМС: RS , T , D і JK .

4 Порядок виконання роботи

4.1 Ознайомтесь з робочим місцем, устаткуванням і приладами.

4.2 Увімкніть вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановіть у праве положення.

4.3 Дослідження роботи симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах

4.3.1 Дослідіть мультівібратори за допомогою схеми, зображеної на рисунку 4.1 (верхня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

Перемикачі $SA1$, $SA2$ встановити у натиснуте положення.

4.3.2 Замалюйте осцилограми напруг у контрольних точках симетричного мультівібратора.

Для цього, встановлюючи органи керування осцилографа у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення:

- 1) ручку резистора R_I встановіть у крайнє праве положення;

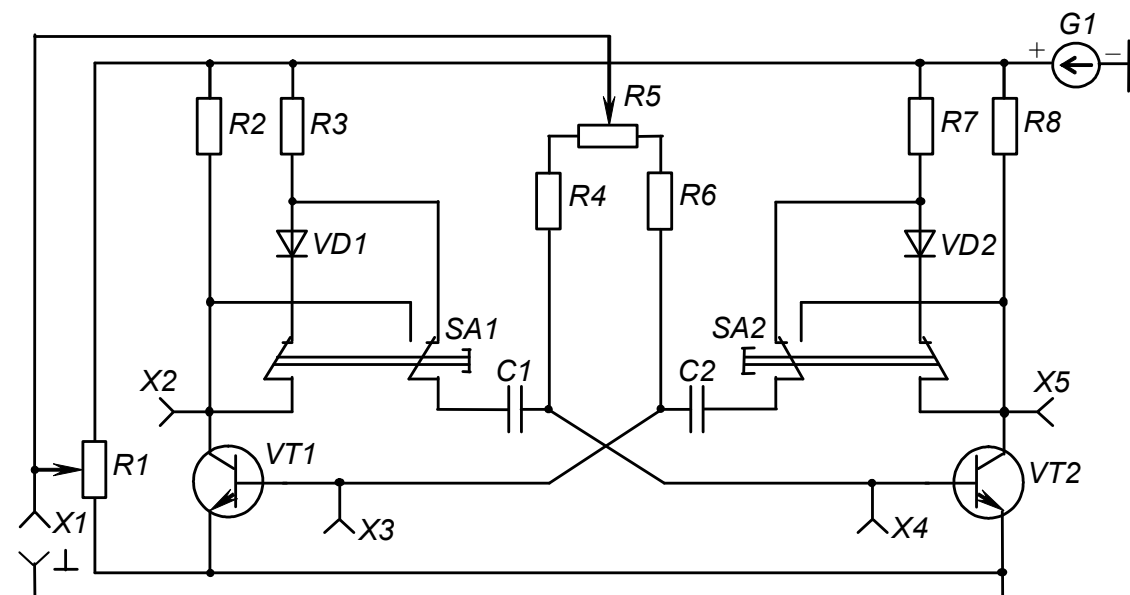


Рисунок 4.1 – Схема для дослідження мультівібраторів

2) кабель першого каналу осцилографа підключіть до клем $X2$ і \perp , а другого – до клем $X3$ і \perp (сигнальним і нульовим привідниками відповідно);

3) обертанням ручки резистора R_5 установіть тривалість імпульсу мультівібратора рівною тривалості паузи між імпульсами.

Замалюйте осцилограми напруг у контрольних точках $X2$ (на колекторі $VT1$) і $X3$ (на базі $VT1$).

Сигнальний провідник кабелю другого каналу осцилографа перенесіть на клему $X5$ і замалюйте осцилограму напруги (на колекторі $VT2$), орієнтуючи її відносно перших двох.

Сигнальний кінець кабелю другого каналу перенесіть на клему $X4$ і замалюйте осцилограму напруги (на базі $VT2$), орієнтуючи її відносно інших осцилограм.

4.3.3 Для середнього положення ручки резистора R_5 за допомогою осцилографа визначте:

1) активну тривалість імпульсу мультівібратора t_i на рівні 0,5 його амплітуди;

2) тривалість паузи між імпульсами t_n на рівні 0,5 амплітуди імпульсів;

3) тривалість періоду надходження імпульсів T ;

4) активну тривалість фронту імпульсу t_ϕ як час зміни напруги від рівня 0,1 до рівня 0,9 амплітуди імпульсу;

5) активну тривалість зрізу (заднього фронту) імпульсу $t_{зр}$ як час зміни напруги від 0,9 до 0,1 амплітуди імпульсу.

Результати експериментів занесіть у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірів та розрахунків параметрів імпульсів

Тип мультівібратора	t_i , мс	t_n , мс	T , мс	t_{ϕ} , мс	$t_{зр}$, мс	f , Гц	Q	Положення ручки резистора R_5
Симетричний								середнє

4.4 Дослідження роботи тригерів на ІМС

4.4.1 Дослідіть тригери за допомогою схеми, зображеної на рисунку 4.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

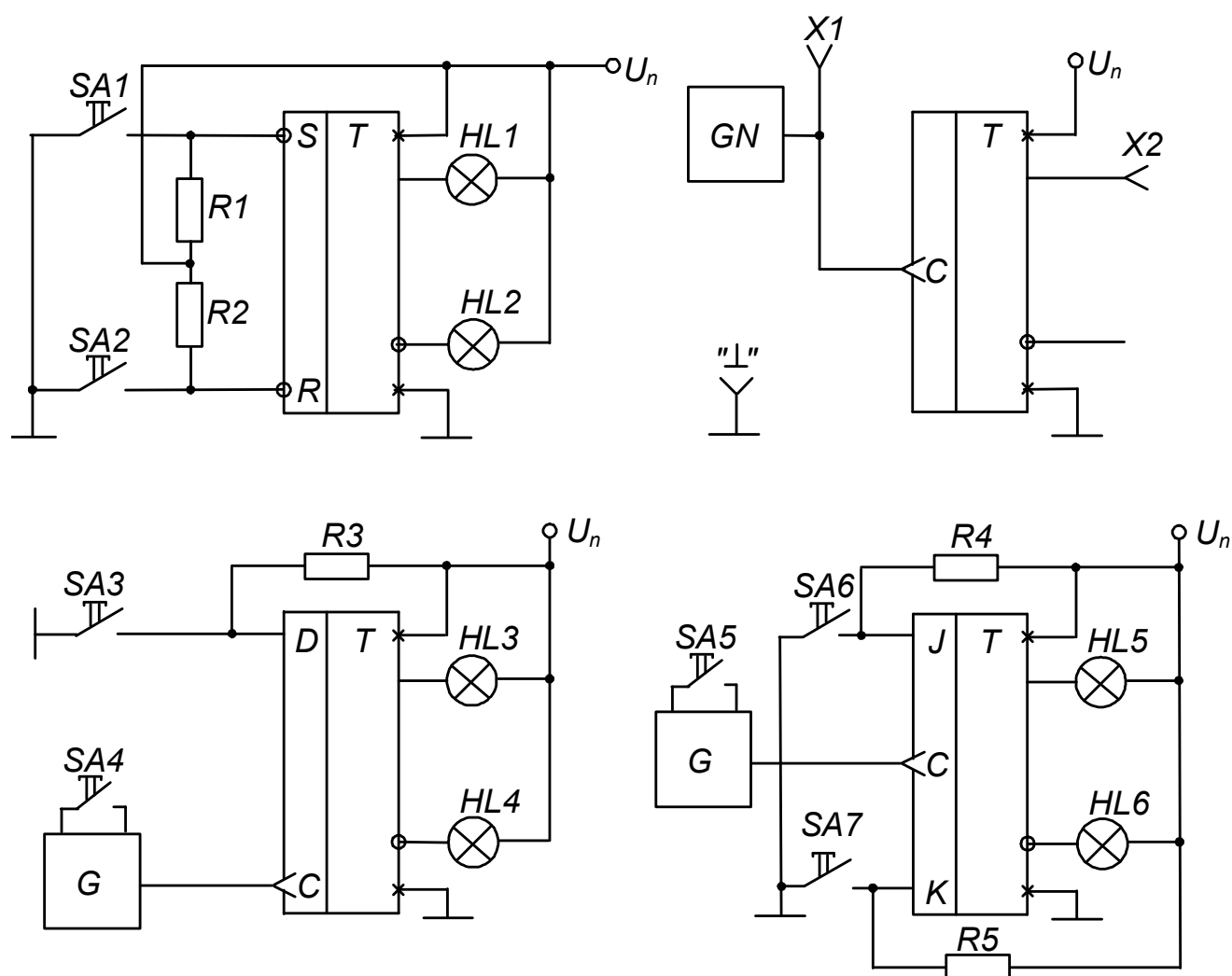


Рисунок 4.2 – Схема для дослідження тригерів

4.4.2 Дослідіть роботу RS-тригера з інверсними входами і складіть його таблицю переходів.

Для цього за допомогою перемикачів $SA1$ і $SA2$ задавайте необхідні комбінації нулів і одиниць на входах тригера S і R . При цьому ненадране положення перемикача відповідає одиничному сигналу (на вхід тригера через резистор R_1 або R_2 подається напруга живлення U_n , світиться сигнальна лампа біля відповідного входу). Надране положення

перемикача відповідає нульовому сигналу (на вхід подається напруга, що дорівнює нулю: вхід підмикається до нульового проводу, сигнальна лампа біля входу не світиться). Реакція тригера визначається за світінням ламп: *HL1* – одиничний стан і *HL2* – нульовий стан.

Результати експерименту занесіть у таблицю 4.3, де позначення t^i і t^{i+1} відповідають моментам часу до і після спрацювання тригера.

Зверніть увагу, що спрацювання тригера відбувається одразу після набору відповідної комбінації сигналів на інформаційних входах (маємо асинхронний тригер).

4.4.3 Дослідіть роботу *T*-тригера і складіть його таблицю переходів.

Кабель першого каналу осцилографа підімкніть до виходу тактового генератора – до клем *X1* та \perp , а кабель другого каналу до прямого виходу тригера – до клем *X2* та \perp . Організування осцилографа встановіть у положення, що забезпечують спостереження стійкого зображення.

Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруг тригера. На основі аналізу їхнього вигляду заповніть таблицю 4.4.

4.4.4 Дослідіть роботу *D*-тригера і складіть його таблицю переходів.

Для цього за допомогою перемикача *SA3* задавайте необхідні значення сигналу на вході *D* (аналогічно пп. 4.5.2).

На вхід синхронізації *C* сигнали генератора *G* подавайте встановленням перемикача *SA4* у натиснуте положення.

Реакцію тригера визначайте за світінням ламп: *HL3* – одиничний стан, *HL 4* – нульовий стан.

Результати експерименту занесіть у таблицю 4.5.

Зверніть увагу на те, що при відповідному сигналі на інформаційному вході *D*-тригер змінює стан тільки після надходження імпульсу на його вхід синхронізації *C* (маємо синхронний тригер).

4.4.5 Дослідіть роботу *JK*-тригера і складіть його таблицю переходів.

Значення вхідних сигналів задавайте перемикачами *SA6* і *SA7* (аналогічно пп. 4.5.2). Сигнали тактового генератора *G* подавайте на вхід синхронізації тригера установкою перемикача *SA5* у натиснений стан. Реакцію тригера визначайте за світінням ламп *HL 5* (одиничний стан) і *HL 6* (нульовий стан).

Таблиця 4.3 – Таблиця переходів *RS*-тригера

t^i		t^{i+1}
S^i	R^i	Q^{i+1}
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Таблиця 4.4 – Таблиця переходів *T*-тригера

t^i	t^{i+1}
C^i	Q^{i+1}
0	
1	

Таблиця 4.5 – Таблиця переходів *D*-тригера

t^i	t^{i+1}
D^i	Q^{i+1}
0	
1	

Таблиця 4.6 – Таблиця переходів JK-тригера

t^i		t^{i+1}
J^i	K^i	Q^{i+1}
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Результати експерименту занесіть в таблицю 4.6.

Зверніть увагу на те, що цей тригер синхронний, а також на те, що при одиничних сигналах на обох інформаційних входах він веде себе як T -тригер.

4.5 Вимкніть прилади і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За осцилограмами напруг у контрольних точках симетричного мультивібратора (пп. 4.3.2) зробіть висновок про співвідношення фаз напруг на колекторах транзисторів.

5.2 За даними таблиці 4.1 розрахуйте значення частоти надходження імпульсів

$$f = 1/T$$

та щільність імпульсів

$$Q = T/t_i$$

симетричного мультивібратора.

Результати розрахунку занесіть у таблицю 4.1.

5.3 На основі аналізу таблиць переходів RS -, D - та JK -тригерів зробіть висновки про їхні специфічні властивості.

5.4 За осцилограмами напруг T -тригера (пп. 4.5.3) визначте частоти надходження імпульсів на вході і виході тригера.

Зробіть висновок про співвідношення цих частот.

Визначте, при якій зміні сигналу на вході (0–1 чи 1–0) тригер змінює свій стан.

6 Пояснення до роботи

6.1 Імпульсні системи та параметри імпульсів і їхньої послідовності

На відміну від аналогових систем, де сигнали змінюються безперервно у часі, в імпульсних системах використовуються сигнали імпульсної форми (напруга, струм).

Імпульсні системи мають більш високі показники к.к.д., точності і завадостійкості. Більш простими є апаратні засоби подання й обробки імпульсної інформації.

Імпульсом називається короткочасна зміна напруги (струму) в електричному колі від нуля до деякого значення, тривалість якої сумірна або менша за тривалість перехідних процесів у цьому колі.

Найчастіше в електронній техніці застосовують імпульси прямокутної форми. Вид реального прямокутного імпульсу позитивної полярності зображено на рисунку 4.3.

Параметри прямокутного імпульсу:

1) амплітуда імпульсу U_i визначає найбільше значення напруги імпульсного сигналу;

2) тривалість імпульсу t_i , залежно від значення напруги, на яке реагує імпульсний пристрій, вимірюють на рівні 0,1 або 0,5 U_i (останнє відповідає активній тривалості, бо характеризує енергетичну дію імпульсу);

3) тривалості фронту t_ϕ та зрізу (заднього фронту) $t_{зр}$ характеризують час зростання і спаду імпульсу (активні тривалості відлічуються, як час зміни напруги між рівнями 0,1 і 0,9 U_i);

4) нерівномірність вершини імпульсу ΔU .

Відхилення форми імпульсу від ідеально прямокутної виникають внаслідок впливу паразитних ємностей та індуктивностей, частотних властивостей підсилюючих елементів, а також визначаються будовою генеруючих і підсилюючих пристроїв.

Параметри послідовності імпульсів, зображеної на рисунку 4.4:

1) період надходження імпульсів T – інтервал часу між однаковими точками двох сусідніх імпульсів;

2) частота повторення (надходження) імпульсів

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

3) тривалість паузи t_n – інтервал часу між закінченням одного і початком наступного імпульсу;

4) щільність імпульсів

$$Q = \frac{T}{t_i} \quad (4.2)$$

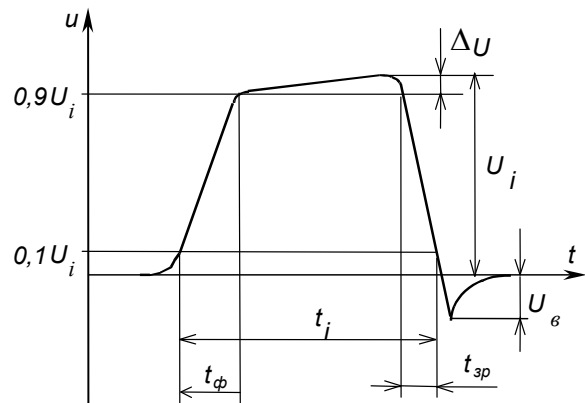


Рисунок 4.3 – Параметри несиметричного імпульсу

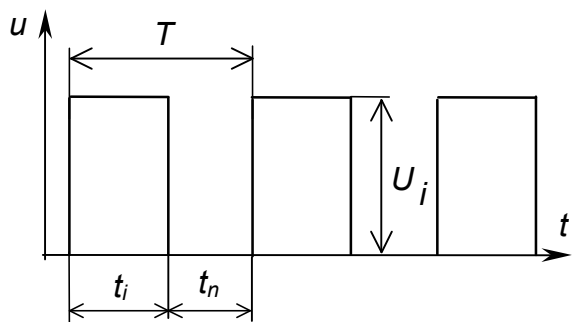


Рисунок 4.4 – Параметри послідовності імпульсів

6.2 Симетричний мультівібратор на біполярних транзисторах

Мультівібратори – це релаксаційні автогенератори напруги прямокутної форми (релаксаційний – такий, що різко відрізняється від гармонійного – синусоїдного; автогенератор – пристрій, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні і не має стійких станів).

Найчастіше мультівібратори працюють у автоколивальному режимі, коли мультівібратор має два нестійких (квазісталіх) стани рівноваги і переходить з одного стану в інший самочинно під впливом внутрішніх перехідних процесів. У такому режимі мультівібратор використовується як генератор прямокутної напруги.

У чекаючому режимі мультівібратор має один сталий і один квазісталий стани рівноваги. Зазвичай він знаходиться у сталому стані і переходить до квазісталого під дією зовнішнього електричного сигналу. Час перебування у квазісталому стані визначається внутрішніми процесами в схемі мультівібратора. Такі мультівібратори використовуються для формування імпульсів напруги необхідної тривалості, а також для затримки імпульсів на визначений час.

У режимі синхронізації використовується мультівібратор, що працює в автоколивальному режимі, але його перехід із одного стану в інший забезпечується зовнішньою синхронізуючою напругою. Для його нормальної роботи у цьому режимі необхідно, щоб частота синхронізуючого сигналу перевищувала частоту власних коливань. В результаті частота коливань мультівібратора практично не залежить від дестабілізуючих факторів. Використовуються такі мультівібратори для створення генераторів стабільної частоти і при керуванні складними електронними пристроями, робота яких синхронізована якоюсь зовнішньою дією.

Мультівібратори можуть бути виконані на транзисторах, операційних підсилювачах і цифрових елементах.

Симетричний мультівібратор являє собою релаксаційний автогенератор напруги прямокутної форми, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні.

На рисунку 4.5 зображено схему мультівібратора на біполярних транзисторах, який виконано за симетричною схемою з колекторно-базовими зв'язками.

Мультівібратор складається з двох каскадів підсилення з СЕ (наприклад, $VT1$, R_{K1} , R_{B1}).

Для забезпечення позитивного зворотного зв'язку, що за його рахунок мультівібратор самозбуджується, вихідна напруга кожного з каскадів подається на вхід іншого.

Симетричність означає ідентичність параметрів симетрично розташованих елементів схеми.

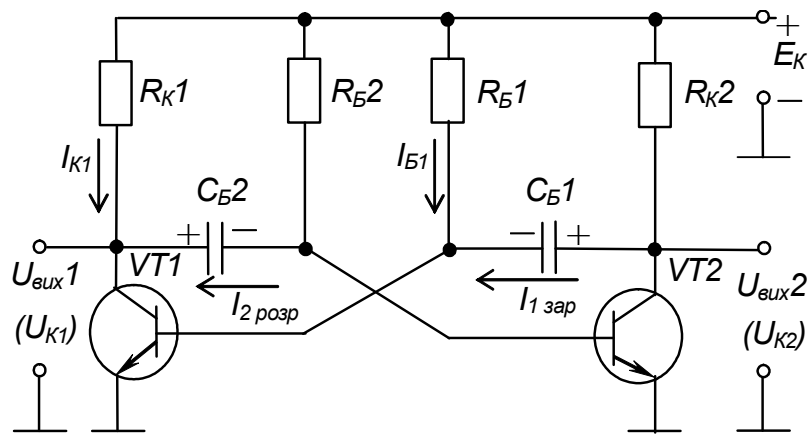


Рисунок 4.5 – Мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками

Мультивібратор має два тимчасово сталих (квазісталих) стани, коли один із транзисторів закритий, а другий відкритий. Транзистори працюють у ключовому режимі.

Уявимо, що початковий стан мультивібратора такий: транзистор $VT1$ знаходиться у режимі насичення (відкритий), а $VT2$ – у режимі відтинання (закритий). При цьому і надалі:

- 1) через $VT1$ і R_{K1} від E_K протікає колекторний струм насичення I_{K1} ;
- 2) через R_{B1} і базо-емітерний перехід $VT1$ протікає струм бази I_{B1} , що утримує цей транзистор у режимі насичення;
- 3) конденсатор C_{B1} швидко заряджається струмом $I_{1зар}$ від E_K через R_{K2} і базо-емітерний перехід $VT1$;
- 4) конденсатор C_{B2} , заряджений із вказаною на схемі полярністю до напруги E_K (у попередньому такті роботи), через відкритий транзистор $VT1$ підімкнений до нульової точки, з-за чого через нього протікає струм $I_{2розр}$ від E_K через R_{B1} ; цей струм намагається перезарядити C_{B2} від напруги мінус E_K до напруги $+E_K$, а негативна напруга з C_{B2} подається на базу транзистора $VT2$ відносно його емітера і утримує транзистор у закритому стані;
- 5) процес перезаряду конденсатора C_{B2} триває доти, доки напруга на ньому не перетне нульового рівня і не стане вищою за граничну напругу базо-емітерного переходу транзистора $VT2$ ($U_{BEнас} \approx 0,6$ В), після чого потече базовий струм $VT2$ і він почне відкриватися;
- 6) через $VT2$, що перейшов у активний режим, конденсатор C_{B1} обкладкою «+» підмикається до нульової точки, і негативна напруга з C_{B2} подається на базу $VT1$ відносно його емітера, закриваючи транзистор;
- 7) як тільки $VT1$ починає закриватися, збільшується позитивна напруга на його колекторі і починає заряджатися C_{B2} від E_K через R_{K1} і базо-емітерний перехід $VT2$, за рахунок чого останній відкривається ще більше – діє позитивний зворотний зв'язок. У результаті цього розвивається лавиноподібний регенеративний процес, після закінчення якого $VT1$

повністю закривається, а $VT2$ відкривається і мультивібратор переходить до свого другого квазісталого стану.

Далі процеси протікають аналогічно, тільки тепер заряджається C_{B2} , а перезаряджається C_{B1} .

Таким чином, робота схеми забезпечується за рахунок автоматичної комутації конденсаторів ключами-транзисторами.

Умовами працездатності мультивібратора є:

$$R_{K2} \cdot C_{B1} < R_{B2} \cdot C_{B2} ;$$

$$R_{K1} \cdot C_{B2} < R_{B1} \cdot C_{B1}. \quad (4.3)$$

Переходячи періодично з одного квазісталого стану в другий, мультивібратор формує напругу прямокутної форми, яку можна знімати з колектора будь-якого транзистора.

Описані процеси представлені у вигляді часових діаграм на рисунку 4.6.

Тривалість імпульсів, що знімаються з колекторів транзисторів $VT1$ і $VT2$, становить відповідно

$$t_1 \approx 0,7 R_{B1} \cdot C_{B1}; \quad (4.4)$$

$$t_2 \approx 0,7 R_{B2} \cdot C_{B2}. \quad (4.5)$$

Вона визначається параметрами елементів часозадаючих ланцюжків R_B, C_B , яким відповідає стала часу перезаряду $\tau_n = R_B C_B$.

Період надходження імпульсів

$$T \approx t_1 + t_2. \quad (4.6)$$

Для симетричного мультивібратора

$$T \approx 1,4 R_B \cdot C_B. \quad (4.7)$$

Співвідношення значень t_1 і t_2 (щільність) можна змінювати, порушуючи симетрію схеми: наприклад, збільшуючи опір одного з базових резисторів і пропорційно зменшуючи опір іншого (за допомогою резистора R_5 на рисунку 4.1). При цьому тривалість періоду надходження імпульсів залишається незмінною.

Якщо змінювати опір тільки одного базового резистора або ємність одного з конденсаторів часозадаючого ланцюжка, то при постійній тривалості імпульсу (або паузи) будуть змінюватися і частота, і щільність.

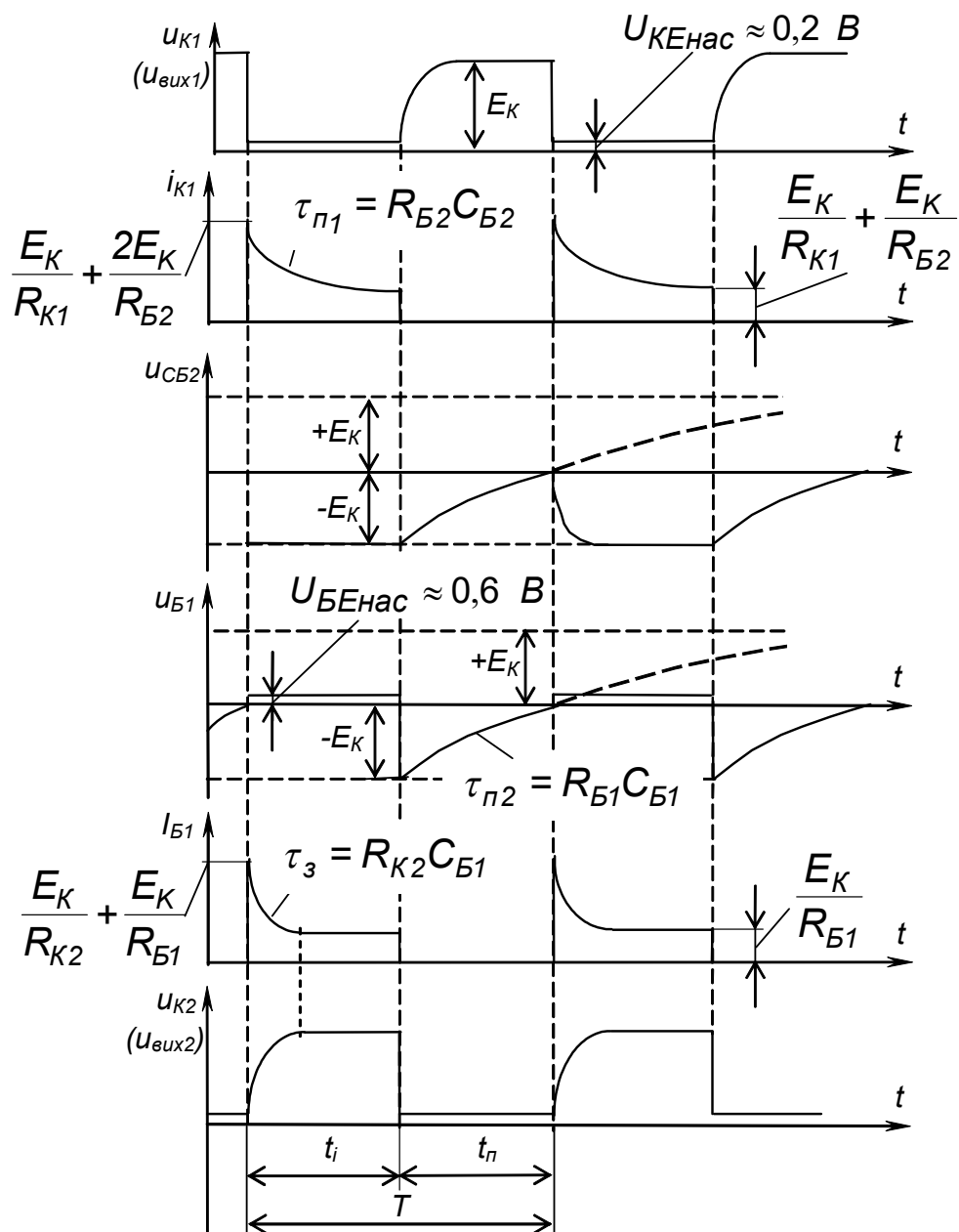


Рисунок 4.6 – Часові діаграми роботи мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками

6.3 Тригери на ІМС

Тригером називається електронний пристрій, що має два сталих стани рівноваги і може переходити із одного стану в інший під дією керуючого сигналу, що перевищує деякий рівень – поріг спрацьовування пристрою. За відсутності керуючого сигналу тригер може як завгодно довго знаходитися в одному зі сталих станів.

Тригери можуть виконувати функції реле, перемикачів, елементів пам'яті. На їх основі будуються лічильники, регістри, дільники частоти та інші пристрої з пам'яттю, що відносяться до класу цифрових послідовнісних – у яких стан залежить не тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу, але і від стану в попередній момент часу.

Тригери будують на транзисторах, тиристорах та інших електронних приладах. Сучасні тригери, як правило, будують на основі двокаскадних підсилювачів з позитивним зворотним зв'язком. Тригери у інтегральному виконанні будують на логічних цифрових елементах.

Тригер на цифрових елементах має у своєму складі власне тригер (як пристрій із двома стійкими станами – елемент пам'яті) і логічний пристрій керування (ПК), що визначає функціональні можливості тригера. ПК перетворює інформацію, що надходить на його входи, у сигнали, що керують елементом пам'яті.

За способом запису інформації тригери поділяються на асинхронні, у яких запис інформації в елемент пам'яті відбувається у момент надходження сигналів на інформаційні входи ПК, і синхронні, у яких запис відбувається тільки після надходження синхронізуючого (тактуючого) сигналу на тактовий вхід ПК.

Робота тригерів (як і послідовнісних пристроїв взагалі) описується таблицями переходів, стовпці яких відповідають значенням вхідних сигналів у даний момент часу t^i і стану тригера у наступний момент часу t^{i+1} , а кількість рядків дорівнює кількості можливих комбінацій вхідних сигналів. Вхідні сигнали і стани позначають нулями й одиницями.

Тригер має два виходи, наявність високого рівня напруги на одному з яких відповідає одиничному (зведеному) стану – прямий вихід Q , а на іншому – нульовому (скиненому) стану – інверсний вихід \bar{Q} .

Стани тригерів позначають так:

0 – тригер знаходиться у нульовому стані незалежно від сигналів на входах ($Q = 0$);

1 – тригер знаходиться в одиничному стані незалежно від сигналів на його входах ($Q = 1$);

\underline{Q} – стан тригера не змінюється зі зміною інформації на входах;

\bar{Q} – стан тригера змінюється на протилежний при зміні інформації на входах;

X – невизначений стан (коли після отримання інформаційного сигналу тригер рівноможливо може опинитися у будь-якому сталому стані і, за відсутності зовнішніх сигналів керування, може знаходитися у ньому

скільки завгодно довго (але тільки за наявності живлення – маємо енергозалежну пам'ять).

Найчастіше застосовуються кілька різновидів тригерів (з практично необмеженого числа можливих).

Розглянемо тригери, що досліджуються у даній роботі.

Умовне позначення асинхронного RS -тригера з інверсними входами наведено на рисунку 4.7, а його робота описана таблицею переходів – таблиця 4.7.

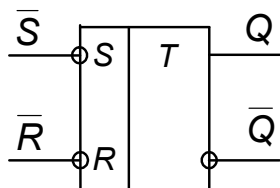


Рисунок 4.7 – Умовне позначення RS -тригера

Таблиця 4.7 –
Таблиця переходів
асинхронного
 RS -тригера
з інверсними входами

t^i		t^{i+1}
\overline{S}^i	\overline{R}^i	Q^{i+1}
0	0	1. X
0	1	1
1	0	2. 0
1	1	Q^i

З таблиці видно, що встановлення тригера у одиничний стан забезпечується подачею 0 (напруги низького рівня) на вхід S при 1 (напрузі високого рівня) на вході R (тригер керується нульовими сигналами).

Для встановлення тригера у нульовий стан комбінація вхідних сигналів повинна бути зворотною.

За умови наявності одиничних сигналів на обох входах стан тригера залишається незмінним як завгодно довго (режим збереження інформації).

Нульові сигнали на обох входах переводять тригер у невизначений стан (оскільки керуючими сигналами є нулі, то тригер у даному разі ніби повинен одночасно встановлюватися в обидва стани).

Умовне позначення T -тригера показане на рисунку 4.8, а робота описана таблицею 4.8.

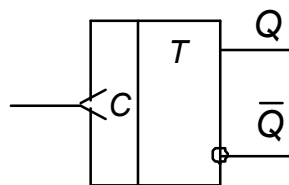


Рисунок 4.8 – Умовне позначення T -тригера

Таблиця 4.8 –
Таблиця переходів
 T -тригера

t^i	t^{i+1}
C^i	Q^{i+1}
0	\overline{Q}^i
1	Q^i

Цей тригер має тільки один тактовий вхід, а його стан змінюється на протилежний із надходженням на вхід кожного тактового імпульсу, у даному випадку при зміні стану на вході з 1 на 0. Такі тригери застосовують у лічильниках імпульсів і дільниках частоти.

Умовне позначення D -тригера показано на рисунку 4.9, а робота описана таблицею 4.9.

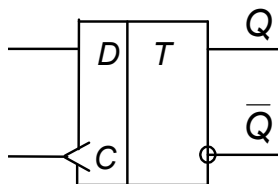


Рисунок 4.9 – Умовне позначення D -тригера

Таблиця 4.9 –
Таблиця переходів
 D -тригера

t^i	t^{i+1}
D^i	Q^{i+1}
0	0
1	1

Цей тригер має один інформаційний вхід і один тактовий. Стан тригера у наступний момент часу відповідає стану інформаційного входу на даний момент (здійснюється затримка передачі інформації на вихід на один такт – період – синхронізуючих імпульсів).

D -тригери часто використовуються для створення регістрів пам'яті (наприклад, пристрою керування дисплеєм у цифровому вольтметрі).

Умовне позначення JK -тригера наведено на рисунку 4.10, а робота його описана таблицею 4.10.

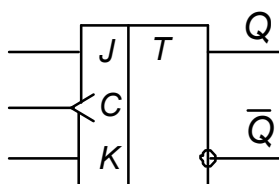


Рисунок 4.10 – Умовне позначення JK -тригера

Таблиця 4.10 –
Таблиця переходів
 JK -тригера

t^i		t^{i+1}
J^i	K^i	Q^{i+1}
0	0	Q^i
0	1	0
1	0	1
1	1	\overline{Q}

JK -тригер багато у чому аналогічний асинхронному RS -тригеру з прямими входами (керуваному одиничними сигналами). Роль входів S і R виконують входи J і K . Тільки при подачі на обидва інформаційні входи одиничних сигналів тригер при надходженні тактового імпульсу переходить в стан, протилежний попередньому як T -тригер, а не у невизначений як RS -тригер.

JK -тригер є універсальним, бо може виконувати роль RS -, T - або D -тригера при певних зовнішніх з'єднаннях.

Зазвичай у одному корпусі ІМС міститься від одного до чотирьох тригерів (іноді зі спільними колами керування). Вони можуть мати також додаткові входи, наприклад, установки у нульовий стан – R .

Контрольні запитання

- 1. Поясніть, що таке мультивібратор, у яких режимах можуть працювати мультивібратори, для чого вони призначені?*
- 2. Поясніть характер осцилограм напруг симетричного мультивібратора на біполярних транзисторах.*
- 3. Поясніть, як можна змінювати частоту надходження імпульсів мультивібратора на біполярних транзисторах?*
- 4. Поясніть, як можна змінювати щільність імпульсів мультивібратора.*
- 5. Покажіть шляхи протікання струмів у мультивібраторі.*
- 6. Поясніть причину спотворення фронту і як можна поліпшити форму імпульсів мультивібратора на біполярних транзисторах?*
- 7. Поясніть будову, властивості і призначення тригерів, способи опису їхньої роботи.*
- 8. Вкажіть різницю між асинхронним і синхронним тригерами.*
- 9. Поясніть, як працюють RS-тригер, T-тригер, D-тригер, JK-тригер.*

Лабораторна робота № 5
ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ІМС

1 Мета роботи

1. Дослідження логічних елементів.
2. Дослідження реверсивного двійково-десятькового лічильника і двійково-десятькового дешифратора.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 5, 6.
2. Мультиметр ВР11.
3. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Дослідження роботи логічного елемента НІ у статичному і динамічному режимах.
2. Дослідження роботи двохходових логічних елементів АБО-НІ, І та І-НІ у статичному і динамічному режимах.
3. Дослідження роботи дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника.
4. Дослідження роботи дешифратора, що перетворює двійково-десятьковий код у десятиковий.

4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомтеся з робочим місцем і приладами.
- 4.2 Увімкніть вимірювальні прилади і живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановіть у ліве положення.
- 4.3 Дослідіть роботу логічних елементів за допомогою схеми, зображеної на рисунку 5.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).
- 4.4 Дослідження роботи логічного елемента НІ у статичному режимі
 - 4.4.1 Установіть границю виміру мультиметра «20 V» за постійним струмом і підімкніть його до клем X4 та ⊥, дотримуючись полярності. Перемикачі SA3 і SA4 встановіть у натиснуте положення, а всі інші – у ненависнуте.

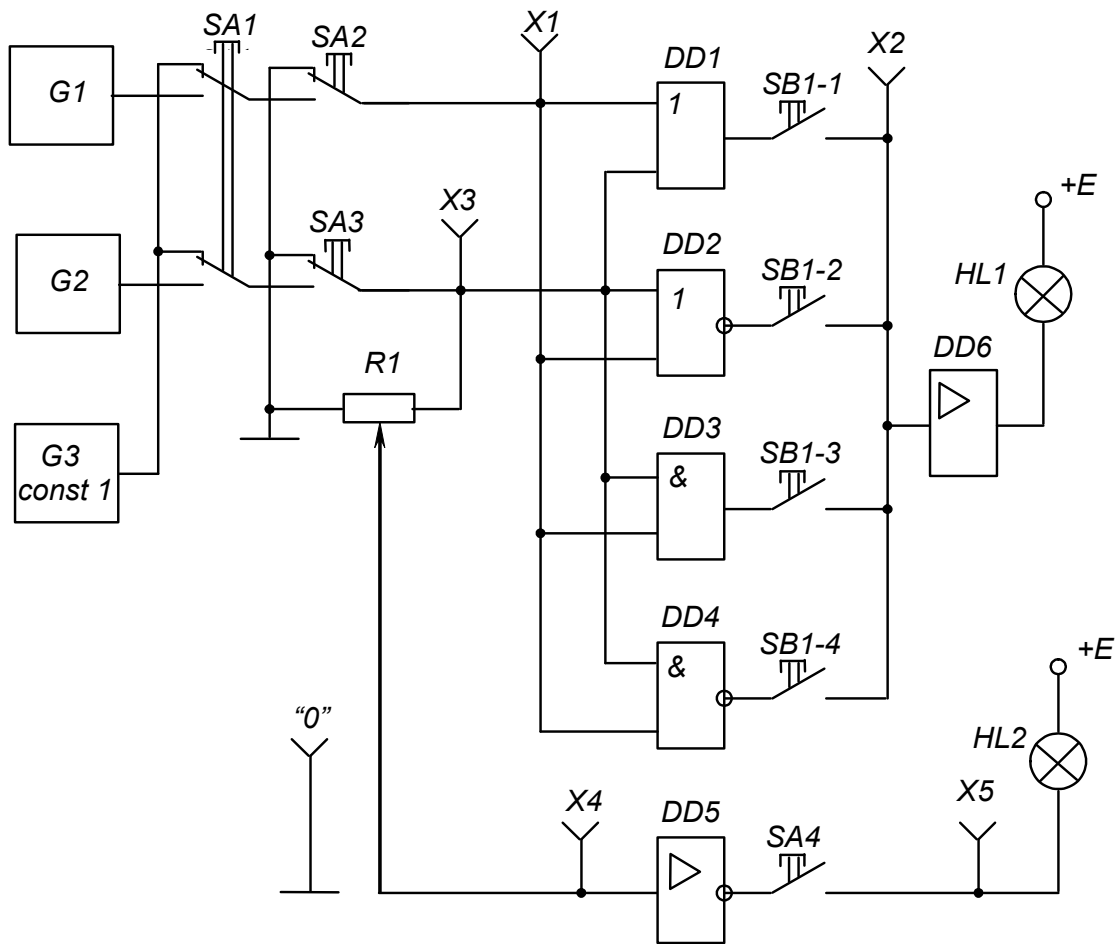


Рисунок 5.1 – Схема для дослідження логічних елементів

4.4.2 Обертаючи ручку резистора R_1 із крайнього лівого положення за годинниковою стрілкою, зафіксуйте момент згасання індикаторної лампи $HL2$.

Запишіть значення вхідної напруги елемента, що відповідає його порогу спрацювання.

4.4.3 Установивши ручку резистора R_1 у крайнє праве положення, запишіть максимальне значення напруги вхідного сигналу (дорівнює напрузі джерела живлення $+E$).

Вимкніть і від'єднайте мультиметр.

4.5 Дослідження роботи логічного елемента НІ у динамічному режимі

Перемикачі $SA1$, $SA3$ і $SA4$ встановіть у натиснуте положення, інші – у ненаτισнуте.

Кабель першого каналу осцилографа підключіть до клем $X4$ і \perp , а другого – до клем $X5$ і \perp сигнальними і нульовими провідниками відповідно. При крайньому правому положенні ручки резистора R_1 установіть органи керування осцилографа в положення, що забезпечують спостереження стійкого зображення.

Замалюйте осцилограми імпульсів напруги на вході і виході елемента НІ.

4.6 Дослідження роботи двовходових логічних елементів АБО-НІ, І та І-НІ у статичному режимі

Підмикання виходу необхідного досліджуваного елемента до підсилювача *DD6* і сигнальної лампи *HL1* виконується встановленням відповідної кнопки перемикача *SB1* у натиснуте положення.

Завдання необхідних комбінацій вхідних сигналів для кожного елемента робіть перемикачами *SA2* і *SA3* (при ненатиснутому положенні перемикача *SA1*).

Натиснуте положення перемикача відповідає одиничному сигналу (світиться сигнальна лампа біля кнопки перемикача), ненатиснуте – нульовому (лампа не світиться).

Вид вихідних сигналів елемента визначається за сигнальною лампою *HL* (за наявності одиничного сигналу вона світиться, за нульового – ні). Результати експерименту занесіть в таблицю 5.1 – узагальнену таблицю істинності.

Таблиця 5.1 – Узагальнена таблиця істинності логічних елементів

Вхідні сигнали		Вихідний сигнал			
<i>SA2</i>	<i>SA3</i>	<i>DD1</i> (АБО)	<i>DD2</i> (АБО-НІ)	<i>DD3</i> (І)	<i>DD4</i> (І-НІ)
0	0				
0	1				
1	0				
1	1				

4.7 Дослідження роботи двовходових логічних елементів у динамічному режимі

4.7.1 Перемикачі *SA1*, *SA2*, *SA3* встановіть у натиснуте положення, що забезпечить автоматичну подачу сигналів на входи логічних елементів від генераторів *G1* і *G2*.

Кабель першого каналу осцилографа підімкніть до клем *X3* і \perp , а другого – до клем *X1* і \perp .

Зарисуйте одну під одною осцилограми імпульсів генераторів *G2* і *G1*, що забезпечують подачу сигналів на входи досліджуваних логічних елементів у динамічному режимі (відповідні послідовності низьких і високих рівнів напруги – нулів і одиниць).

4.7.2 Перенесіть сигнальний провід кабелю другого каналу осцилографа з клем *X1* на клему *X2*.

4.7.3 Переведіть перемикач *SA2* у ненатиснуте положення і знову замалюйте осцилограми вихідних сигналів досліджуваних елементів.

Замалюйте осцилограми вихідних сигналів досліджуваних елементів, підмикаючи їхні виходи до клем *X2* за допомогою перемикача

SB1 (дотримуватись необхідної орієнтації осцилограм відносно сигналів генераторів *G1* і *G2*, звіряючись з осцилограмою першого каналу осцилографа).

4.8 Дослідження роботи дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника

4.8.1 Дослідити роботу лічильника за допомогою схеми, наведеної на рисунку 5.2 (нижня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

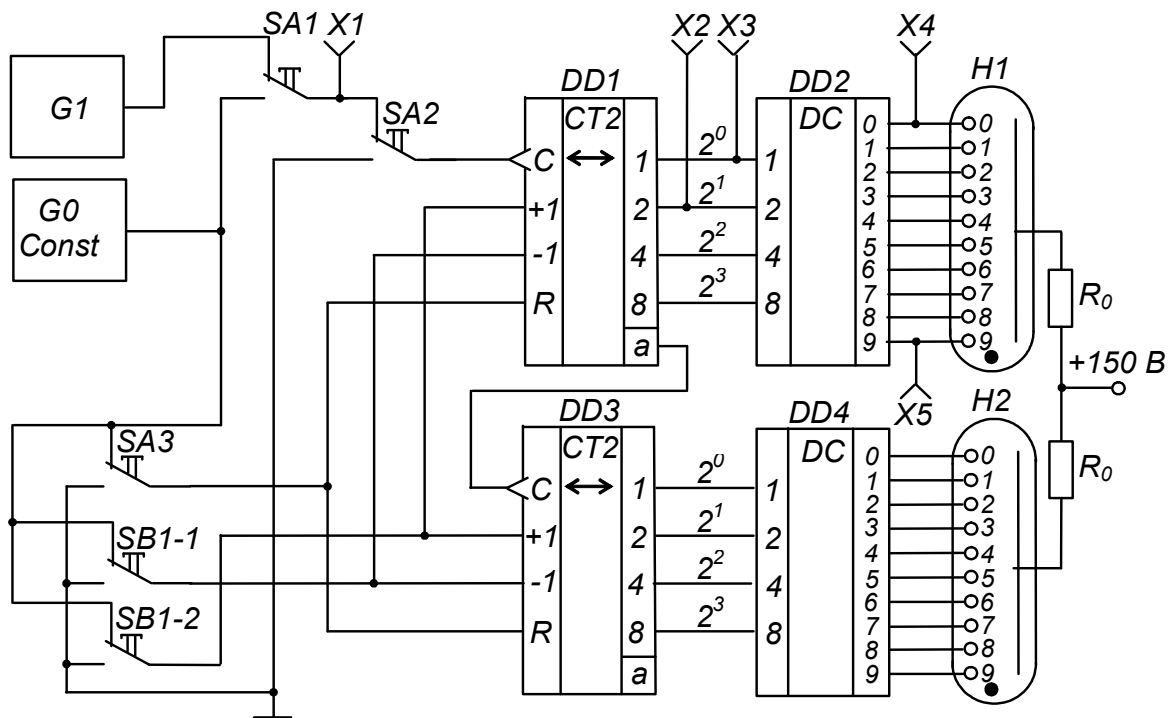


Рисунок 5.2 – Схема для дослідження дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника і двійково-десятькового дешифратора

4.8.2 Очистіть лічильник (установити в нульовий стан) натисканням кнопки *SA3*.

Встановіть у натиснуте положення перемикачі *SA1* і *SB1-1* – завдання роботи лічильника у режимі підсумовування.

Подаючи сигнали (імпульси) на вхід лічильника натисканням кнопки *SA2*, фіксуйте стан лічильника за сигнальними лампами, що підключені до виходів його розрядів: « 2^0 », « 2^1 », « 2^2 », « 2^3 » (світяться при одиничних станах виходів). Кожне натискання на кнопку *SA2* збільшує вміст лічильника на одиницю. Двійково-десятьковий код лічильника за допомогою дешифраторів *DD2*, *DD4* перетворюється на сигнали керування цифровими індикаторами: порядковий номер вхідного імпульсу фіксується індикаторами *H1*, *H2*.

Заповніть таблицю переходів лічильника – таблиця 5.2.

Таблиця 5.2 – Таблиця переходів двійково-десятькового лічильника

Номер вхідного імпульсу	Стан розрядів лічильника			
	2^3	2^2	2^1	2^0
0 *)				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
*) Відповідає нульовому (вихідному) стану лічильника.				

Зверніть увагу, що при подачі десятого імпульсу перший розряд лічильника *DD1* (розряд одиниць) переходить у нульовий стан і відбувається запис одиниці у другий розряд *DD2* (розряд десятків).

4.8.3 Встановіть перемикач *SB1-2* у натиснуте положення – задати роботу лічильника у режимі віднімання.

Тепер кожне натискання на кнопку *SA2* призводить до зменшення вмісту лічильника на одиницю (контролювати за індикаторними лампами і порівнювати з таблицею 5.2).

4.8.4 Встановіть перемикач *SA1* у ненатиснуте положення і, задаючи режим підсумовування встановленням у натиснуте положення перемикач *SB1-1*, або віднімання – встановленням *SB1-2* у ненатиснуте положення, спостерігайте за роботою лічильника в автоматичному режимі при подачі вхідних сигналів від генератора *G1*.

4.8.5 Встановіть перемикач *SB1-1* у натиснуте положення (режим підсумовування).

Підімкніть кабель першого каналу осцилографа до клем *X1* та \perp , а другого – до клем *X3* і \perp (перемикач осцилографа *Развёртка* встановіть у положення «0,2 S»).

Замалюйте осцилограми вхідних сигналів лічильника (клема *X1*) і сигналів на виході молодшого розряду лічильника 2^0 (клема *X3*).

Перенесіть сигнальний провід кабелю другого каналу осцилографа з клем *X3* на клему *X2* і замалюйте осцилограму сигналів на виході другого розряду лічильника 2^1 . Зверніть увагу на її характер при надходженні кожного десятого вхідного імпульсу.

4.9 Дослідження роботи двійково-десятькового дешифратора

Дослідити роботу дешифратора також за допомогою схеми, наведеної на рисунку 5.2.

Підімкніть кабель першого каналу осцилографа до клем $X3$ та \perp , а другого – до клем $X4$ і \perp . Замалюйте осцилограми сигналів на виході першого розряду лічильника і нульовому виході дешифратора.

Перенесіть сигнальний провід кабелю першого каналу з клем $X3$ на клему $X5$ і замалюйте осцилограму сигналу на дев'ятому виході дешифратора, орієнтуючи її за осцилограмою другого каналу.

4.10 Вимкніть прилади і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За результатами досліджень пп. 4.4 зробіть висновок про співвідношення значень напруги одиничного вхідного сигналу елемента НІ (напруги джерела живлення) і напруги порога спрацьовування елемента.

5.2 За осцилограмами пп. 4.5 зробіть висновок про фазове співвідношення вхідного і вихідного сигналів елемента НІ.

5.3 На основі аналізу таблиці істинності табл. 5.1 зробіть висновок про специфіку роботи логічних елементів АБО, АБО-НІ, І, І-НІ.

5.4 Зіставте результати дослідження логічних елементів у статичному (пп. 4.6) і динамічному (пп. 4.7) режимах. Зверніть увагу на те, що при ненатиснутому положенні перемикача $SA3$ елемент АБО стає повторювачем сигналу, АБО-НІ – інвертором, І – генератором константи нуля – $\text{const } 0$, а І-НІ – генератором константи одиниці – $\text{const } 1$.

5.5 За осцилограмами пп. 4.8.5 зробіть висновок про співвідношення тривалості періодів надходження імпульсів на вході і виходах лічильника.

5.6 На основі аналізу осцилограм за пп. 4.9 зробіть висновок про моменти появи сигналів на виходах дешифратора.

Пояснення до роботи

Основу сучасних цифрових пристроїв обробки інформації складають цифрові ІМС, призначені для перетворення й обробки інформації, представленої у вигляді електричних сигналів, що змінюються за законом дискретної функції (у двійковому або іншому дискретному коді).

Аналіз роботи цих пристроїв базується на використанні апарата математичної логіки – алгебри логіки (алгебри Буля). У її основі лежить поняття події, що оцінюється з позиції її настання: вона може статися, або не статися. Отже, кожній події можна приписати значення істинності, що моделюється, наприклад, одиницею (при електричному моделюванні -

високим рівнем напруги), або хибності, що моделюється нулем (низьким рівнем напруги).

Обробка інформації, поданої у вигляді подій, ведеться у двійковій системі числення, де є тільки дві цифри: 0 і 1. Величина, котра може приймати тільки ці два значення, називається двійковою змінною.

Складна подія, що залежить від декількох двійкових змінних, називається двійковою функцією:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x = [1, 0]. \quad (5.1)$$

Цифрові пристрої поділяються на два великих класи: комбінаційні і послідовнісні.

Комбінаційні пристрої реалізують функції, що залежать тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу і не залежать від стану пристрою в попередній момент часу.

Послідовнісні пристрої реалізують функції, що залежать не тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу, але і від стану пристрою в попередній момент часу (тобто вони мають здатність запам'ятовувати свій стан).

Найпростішою логічною функцією є заперечення (інверсія):

$$y = \bar{x}. \quad (5.2)$$

Позначення елемента, що реалізує цю функцію – елемента НІ (інвертора) – наведене на рисунку 5.3.

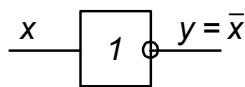


Рисунок 5.3 –
Елемент НІ (інвертор)

У якості елемента НІ можна використати підсилювач з СЕ, що працює у ключовому режимі: за наявності високого рівня напруги на вході на виході буде низький рівень, і навпаки.

Функцію, що її виконує комбінаційний пристрій, для полегшення сприйняття часто представляють у вигляді таблиці, яку називають таблицею істинності.

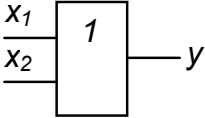
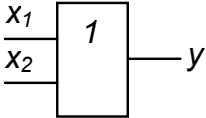
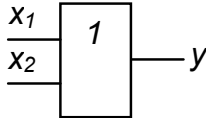
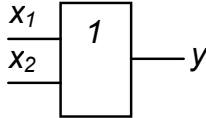
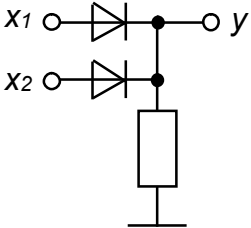
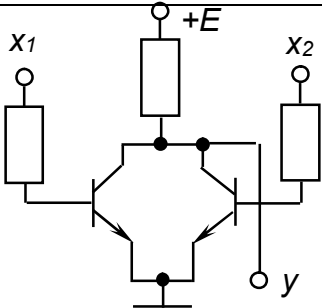
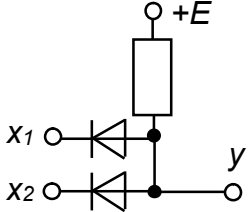
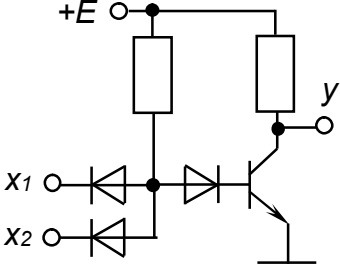
Таблиця істинності має кількість стовпців, що дорівнює кількості вхідних змінних і ще один стовпець, що показує значення функції для кожної з можливих комбінацій змінних, числу яких відповідає кількість рядків таблиці.

Об'єднана таблиця істинності деяких основних логічних функцій, що залежать від двох змінних, наведена у верхній частині таблиці 5.3.

У нижній її частині міститься інформація про математичне представлення функцій, їхнє графічне позначення і можливу реалізацію.

З таблиці істинності видно, що, наприклад, функція АБО істинна, якщо істинною є хоча б одна зі змінних, що до неї входять, а функція І – тільки у випадку істинності обох змінних.

Таблиця 5.3 – Об'єднана таблиця істинності деяких двовходових логічних елементів

Вхідні змінні		Функція y			
x_1	x_2	АБО	АБО-НІ	І	І-НІ
0	0	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0
Математичний запис (формула)		$y = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$	$y = \overline{x_1 + x_2}$	$y = x_1 \cdot x_2 = x_1 \wedge x_2$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Назва функції		Логічне додавання (диз'юнкція) – функція АБО	Заперечення логічного додавання (стрілка Пірса) – функція АБО-НІ	Логічне множення (кон'юнкція) – функція І	Заперечення логічного множення (штрих Шеффера) – функція І-НІ
Графічне позначення елемента, що реалізує функцію					
Можлива реалізація		 Резисторно-діодна логіка (РДЛ)	 Резисторно-транзисторна логіка (РТЛ)	 Резисторно-діодна логіка (РДЛ)	 Резисторно-діодно-транзисторна логіка (РДТЛ)

У статичному режимі робота логічних елементів досліджується при завданні на їхніх входах необхідних значень змінних і спостереженні значення на виході елемента.

У динамічному режимі завдання значень входних змінних здійснюється за допомогою синхронних генераторів імпульсів такої довжини, що перебір усіх можливих комбінацій входних сигналів забезпечується автоматично.

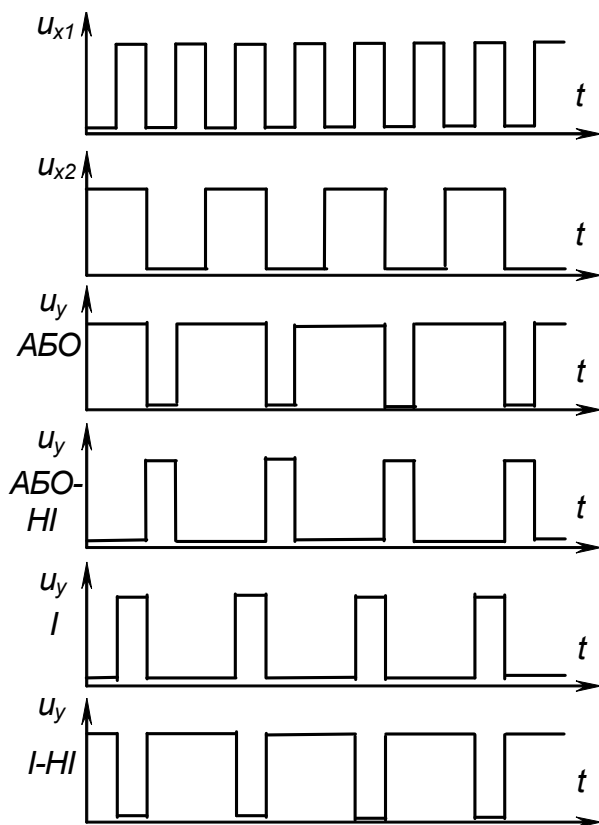


Рисунок 5.4 – Часові діаграми роботи деяких двовходових логічних елементів

На рисунку 5.4 показано часові діаграми роботи логічних елементів, наведених у таблиці 5.3 у динамічному режимі (порівняйте дані таблиці з часовими діаграмами)

Кількість входних змінних логічного елемента теоретично може бути будь-якою. У елементів, що випускаються у вигляді ІМС середнього ступеня інтеграції, вона зазвичай становить 2 (чотири елементи в одному корпусі зі спільними колами живлення), 3 (три елементи у корпусі), 4 (два елементи), 8 (один елемент). Найчастіше це елементи І-НІ та АБО-НІ (як такі, що складають функціонально повну систему логічних елементів).

Складні логічні функції реалізуються за допомогою простих.

Наприклад, функція

$$y = (x_1 + x_2 + x_3) \cdot \overline{x_1 + x_5 + x_4 + x_5} \quad (5.3)$$

може бути реалізована за допомогою схеми, наведеної на рисунку 5.5.

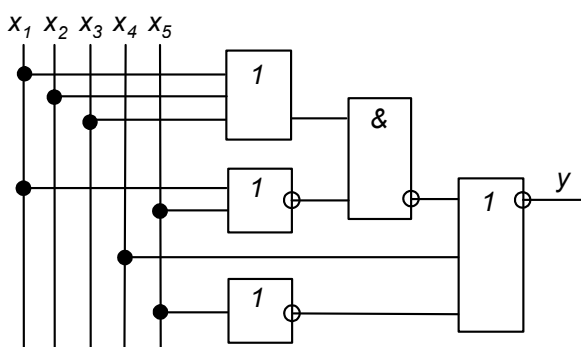


Рисунок 5.5 – Приклад схемної реалізації логічної функції

При реалізації складних комбінаційних пристроїв їх спочатку описують за допомогою логічних функцій. Потім ці функції мінімізують на основі законів алгебри логіки з урахуванням специфіки застосовуваних стандартних елементів (кількість входів), наявності необхідних елементів у використаній серії ІМС. Будь-який як завгодно складний пристрій може бути реалізований за допомогою елементів І, АБО, НІ або тільки елементів АБО-НІ, або тільки І-НІ.

Система таких елементів (із трьох, як І, АБО, НІ, або одного, як АБО-НІ чи І-НІ) називається функціонально повною.

Одними з найбільш широко застосовуваних різновидів комбінаційних пристроїв більш складних, ніж розглянуті логічні елементи, що реалізують найпростіші функції, є дешифратори.

Дешифратори (декодери) кожній комбінації вхідних сигналів ставлять у відповідність визначену комбінацію вихідних.

Наприклад, у досліджуваного в роботі двійково-десятькового дешифратора кожній комбінації нулів і одиниць на входах відповідає нульовий рівень на одному з виходів, кожний з яких керує відповідним електродом десятикового індикатора. Тобто, двійково-десятьковий код за допомогою цього пристрою перетворюється у десятиковий. Будується дешифратор на елементах, що реалізують прості логічні функції.

Однією з найбільш розповсюджених операцій у пристроях інформаційно-обчислювальної і цифрової вимірювальної техніки є фіксування кількості імпульсів, тобто їх підрахунок. Виконують цю операцію лічильники імпульсів, що можуть бути простими (підсумовуючими, віднімаючими) або реверсивними (суміщають властивості підсумовуючих і віднімаючих – можуть працювати у тому або іншому режимі за зовнішньою командою).

Зазвичай лічильники будуються на основі тригерів (наприклад, T -тригерів, з'єднаних послідовно).

Максимальне число станів такого лічильника дорівнює 2^n , де n – число двійкових розрядів – тригерів.

Роботу лічильника можна описати таблицею переходів, що показує відповідність між числом вхідних імпульсів і сигналами на виходах розрядів. Робота підсумовуючого послідовного чотирьохрозрядного двійкового лічильника описується таблицею 5.4.

Як видно з цієї таблиці, код на виходах лічильника є послідовним двійковим. Це є код з вагами розрядів 8, 4, 2, 1.

Для зручності реалізації на стандартних ІМС середнього ступеню інтеграції пристроїв, що забезпечують підрахунок у десятиковій системі числення, використовують двійково-десятькові лічильники. Вони відрізняються від послідовних чотирьохрозрядних двійкових тим, що мають не шістнадцять станів (від 0 до 15), а десять (від 0 до 9). Тобто перехід лічильника у нульовий стан відбувається після надходження не кожного шістнадцятого, а кожного десятого імпульсу, як це показано у таблиці 5.5.

Забезпечити перехід послідовного двійкового лічильника у нульовий стан при надходженні десятого імпульсу можна, доповнивши його комбінаційною схемою, що являє собою у даному разі двовходовий елемент І. Входи елемента підмикають до виходів другого і четвертого розрядів лічильника (див. табл. 5.4, позиція 10), а вихід – до входів установки тригерів лічильника у нульовий стан.

Часові діаграми роботи підсумовуючих послідовних чотирирозрядного двійкового і двійково-десятькового лічильників наведені на рисунку 5.6 і

рисунку 5.7 відповідно. Нижні дві діаграми на рисунку 5.7 зображують вигляд сигналів на нульовому і дев'ятому виходах дешифратора.

Таблиця 5.4 – Таблиця переходів підсумовуючого послідовного чотирирозрядного двійкового лічильника

Число вхідних імпульсів (стан)	Стан виходів (розрядів) лічильника			
	Q_8	Q_4	Q_2	Q_1
	2^3	2^2	2^1	2^0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Таблиця 5.5 – Таблиця переходів підсумовуючого послідовного двійково-десятькового лічильника

Число вхідних імпульсів (стан)	Стан виходів (розрядів) лічильника			
	Q_8	Q_4	Q_2	Q_1
	2^3	2^2	2^1	2^0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	0	0	0	0

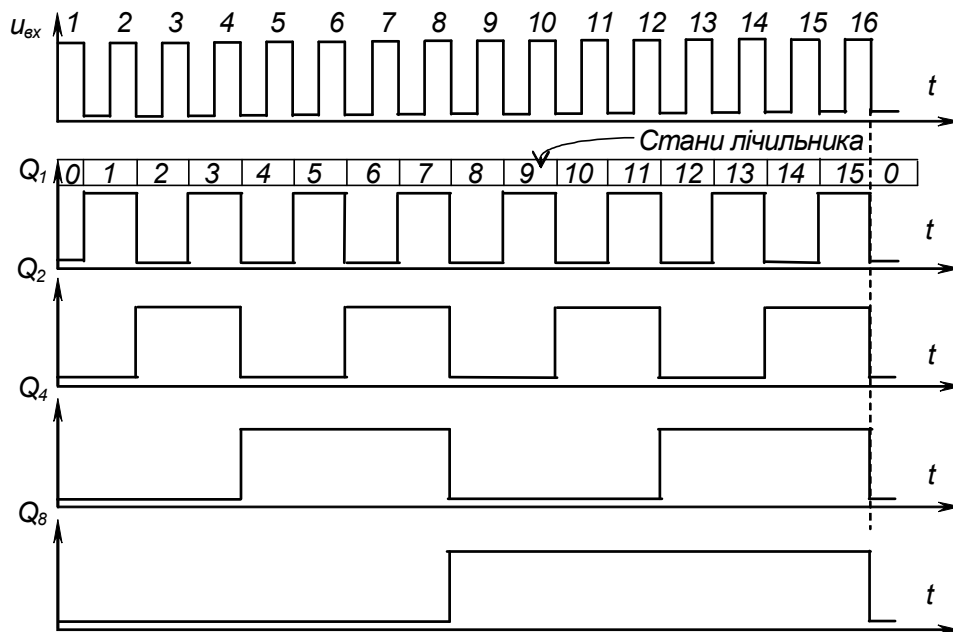


Рисунок 5.6 – Часові діаграми роботи підсумовуючого чотирирозрядного послідовного двійкового лічильника з імпульсним інверсним лічильним входом

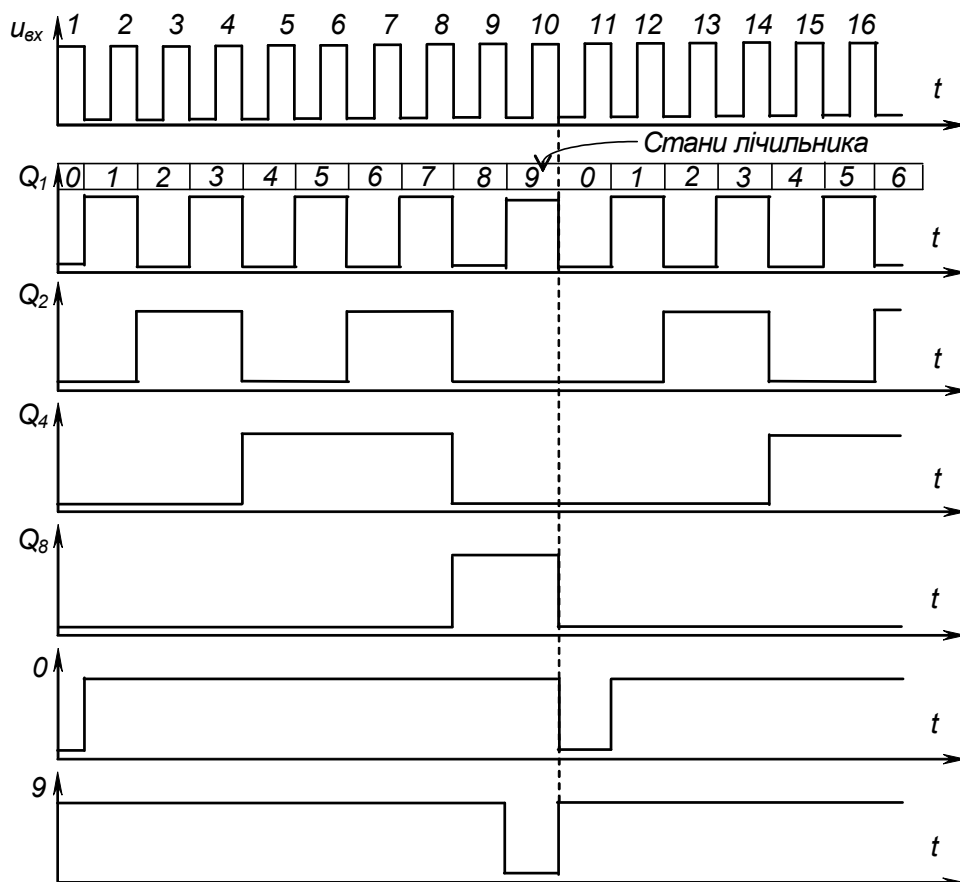


Рисунок 5.7 – Часові діаграми роботи підсумовуючого двійково-десятькового лічильника з імпульсним інверсним лічильним входом і двійково-десятькового дешифратора

Багаторозрядні десяткові лічильники на ІМС середнього ступня інтеграції будуються послідовним з'єднанням необхідної кількості двійково-десяткових. Підрахунок імпульсів ведеться у двійково-десятковому коді. При цьому у межах кожного десяткового розряду – код двійковий. Це полегшує реалізацію дешифратора станів такого лічильника з будь-якою кількістю десяткових розрядів за допомогою стандартних ІМС двійково-десяткових дешифраторів.

Контрольні запитання

- 1. Назвіть основні логічні функції, вкажіть способи їх опису, наведіть приклади реалізації.*
- 2. Складіть з елементів, що реалізують основні логічні функції, комбінаційну схему, яка реалізує складну функцію (за формулою, заданою викладачем). Поясніть, що таке функціонально повна система логічних елементів?*
- 3. Поясніть будову і принцип дії двійково-десяткового дешифратора.*
- 4. Поясніть будову послідовних двійкових лічильників та чим відрізняється двійково-десятковий лічильник від двійкового.*
- 5. Поясніть, як представляються числа у двійково-десятковій системі числення? Наведіть приклад.*
- 6. Переведіть число (за завданням викладача) із двійкової або двійково-десяткової системи числення у десяткову.*
- 7. Поясніть, як будуються багаторозрядні десяткові лічильники на ІМС середнього ступня інтеграції?*
- 8. Поясніть, у чому відмінність комбінаційних цифрових пристроїв від послідовних? Наведіть приклади пристроїв обох типів.*
- 9. Поясніть роботу елементів, що реалізують основні логічні функції за таблицями істинності і часовими діаграмами.*
- 10. Поясніть роботу послідовного двійкового і двійково-десяткового лічильників за таблицями переходів і за часовими діаграмами.*

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

1 Мета роботи

1. Дослідження однофазних схем випрямлення.
2. Дослідження однофазних випрямлячів з пасивними фільтрами і компенсаційним стабілізатором.
3. Дослідження однофазного керованого випрямляча.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний № 5, 6.
2. Осцилограф С1-93 (С1-83).

3 Зміст роботи

1. Дослідити роботу однопівперіодної і мостової однофазних схем випрямлення при роботі на активне навантаження.
2. Дослідити роботу однопівперіодного і мостового однофазних випрямлячів з ємнісним, індуктивним, індуктивно-ємнісними Г-подібним і П-подібним фільтрами та з компенсаційним стабілізатором.
3. Дослідити роботу однофазного керованого випрямляча з нульовим виводом.

4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомтесь з робочим місцем устаткуванням і приладами.
- 4.2 Увімкніть осцилограф та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановіть у праве положення.
- 4.3 Дослідження однопівперіодної і мостової схем випрямлення при роботі на активне навантаження
 - 4.3.1 Дослідження виконуйте за допомогою схеми, наведеної на рисунку 6.1 (верхня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).
- Перемикач «Рег. Выпр.» встановіть у ненатиснуте положення.
- 4.3.2 Зберіть однопівперіодну схему випрямлення, для чого перемикачі встановіть у такі положення: *SA1* – у ненатиснуте, *SA2* – в натиснуте, *SA3* – *SA5* – у ненатиснуте.

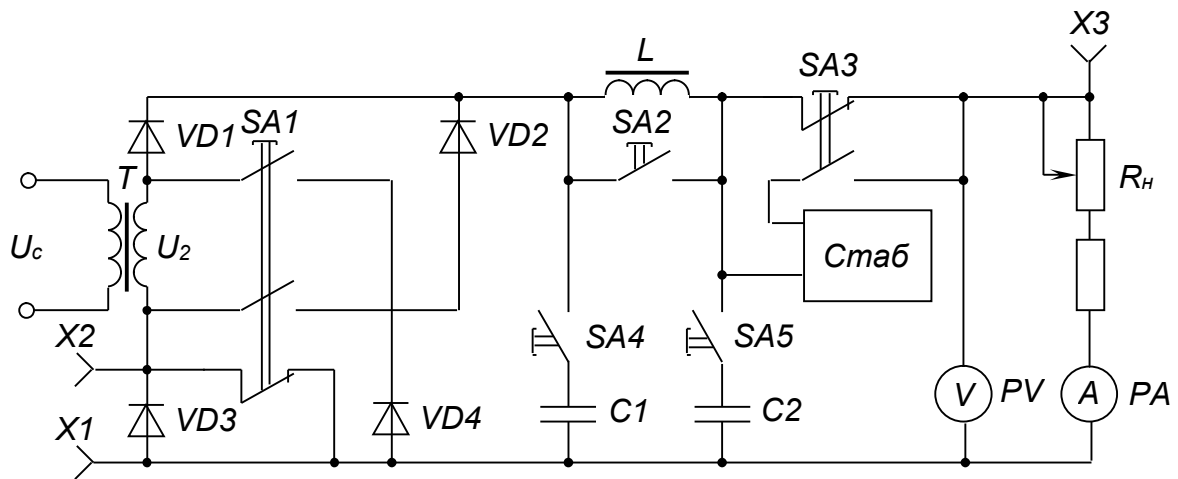


Рисунок 6.1 – Схема для дослідження однофазних некерованих випрямлячів

4.3.3 Замалюйте осцилограму напруги на навантаженні однопівперіодного випрямляча, для чого кабель першого каналу осцилографа підімкнуги нульовим проводом до клемми $X1$, а сигнальним до клемми $X3$.

Замалюйте осцилограму напруги на вентилі (діоді) однопівперіодного випрямляча, для чого кабель першого каналу осцилографа підімкнуги нульовим проводом до клемми $X2$, а сигнальним до клемми $X1$.

При виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлюйте у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення.

4.3.4 Зберіть мостову схему випрямлення, для чого перемикач $SA1$ встановіть у натиснуте положення, а інші перемикачі – згідно з пп. 4.3.2.

4.3.5 Замалюйте осцилограми напруг на навантаженні і діоді мостового випрямляча, використовуючи методику, викладену в пп. 4.3.3.

4.4 Дослідження однопівперіодного і мостового випрямлячів з різними типами фільтрів та з стабілізатором

4.4.1 Зніміть залежність вихідної напруги однопівперіодного і мостового випрямлячів від струму навантаження для різних типів фільтрів і з стабілізатором (зовнішні характеристики), для чого:

- 1) значення струму навантаження задавайте резистором R_n за амперметром PA , встановленим на лицьовій панелі стенда лабораторного;
- 2) значення вихідної напруги фіксуйте за вольтметром PV , встановленим на лицьовій панелі;
- 3) перемикачі $SA1-SA5$ встановлюйте згідно з таблиці 6.1;
- 4) результати занесіть у таблицю 6.2.

Зніміть осцилограми напруги на навантаженні однопівперіодного і мостового випрямлячів з ємнісним та індуктивним фільтрами, а також мостового випрямляча з П-подібним CLC -фільтром і з CLC -фільтром та стабілізатором. Для цього кабель першого каналу осцилографа нульовим проводом підімкніть до клемми $X1$, а сигнальним до $X3$. Тип фільтра задавайте установкою перемикачів згідно таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Положення перемикачів при дослідженнях

Тип випрямляча	Положення перемикачів					Тип фільтра
	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5	
однопівперіодний		X				без фільтра
		X		X	X	C
						L
					X	LC
				X	X	CLC
мостовий	X	X				без фільтра
	X	X		X	X	C
	X					L
	X				X	LC
	X			X	X	CLC
мостовий з стабілізатором	X		X	X	X	CLC

Примітки. 1. У таблиці 6.1 знак «X» відповідає натиснутому положенню перемикача.

2. У таблиці 6.2 позиції, що відповідають значенням струму навантаження, які не можуть бути встановлені за допомогою резистора R_n , не заповнюйте.

Таблиця 6.2 – Результати зняття зовнішніх характеристик

I_n, A			0,1	0,15	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	Тип випрямляча
U_d, B	Тип фільтра	без фільтра									однопівперіодний
		C									
		L									
		LC									
		CLC									
		без фільтра									Мостовий
		C									
		L									
		LC									
		CLC									
		CLC									Мостовий з стабілізатором
*) Строки, помічені цим знаком, заповнюються при виконанні завдання пп. 4.5.3.											

4.5 Дослідження керованого випрямляча з нульовим виводом

4.5.1 Дослідження виконуйте за допомогою схеми, наведеної на рисунку 6.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

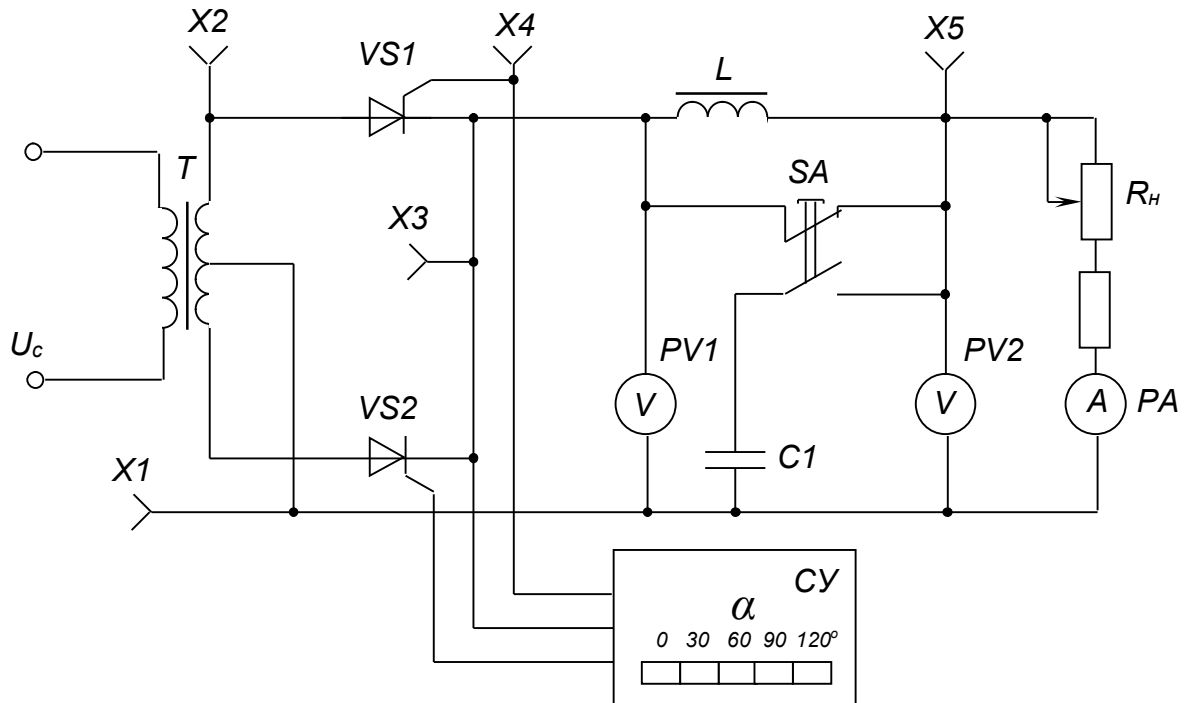


Рисунок 6.2 – Схема для дослідження однофазного керованого випрямляча з нульовим виводом

Перемикач «Рег. выпр.» установіть в натиснуте положення.

Перемикач *SA* встановіть у ненатиснуте положення (відключення фільтра).

4.5.2 Замалюйте осцилограми напруг для кута керування $\alpha = 60^\circ$:

1) на вторинній обмотці трансформатора, для чого підімкніть кабель першого каналу осцилографа до клем *X1* нульовим проводом, а до клем *X2* сигнальним;

2) на навантаженні – клем *X1* і *X5* відповідно;

3) на тиристорі – клем *X3* і *X2*;

4) на керуючому електроді тиристора – клем *X3* і *X4*.

Значення кута керування задавайте встановленням у натиснуте положення відповідної кнопки перемикача « α » системи керування *СУ*.

4.5.3 Зніміть зовнішню характеристику випрямляча з Г-подібним *LC*-фільтром при кутах керування $\alpha = 30^\circ$ і $\alpha = 60^\circ$, для чого:

1) підімкніть фільтр, встановивши перемикач *SA* у натиснуте положення;

2) значення кута керування задавайте натисканням відповідної кнопки перемикача « α » системи керування *СУ*;

3) значення струму навантаження задавайте резистором R_n за амперметром PA ;

4) значення напруги на навантаженні фіксуйте за вольтметром $PV2$;

5) результати експерименту занесіть в таблицю 6.2.

4.5.4 Зніміть залежність вихідної напруги випрямляча від кута керування (регульовальну характеристику) при роботі на активне навантаження, для чого:

1) перемикач SA встановіть у ненатиснуте положення;

2) значення кута керування задавайте перемикачем « α » системи керування СУ;

3) результати експерименту занесіть в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Регульовальна характеристика керованого випрямляча

α , град	0	30	60	90	120
U_d , В					

4.6 Вимкніть живлення осцилографа і стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 У звіті про лабораторну роботу осцилограми розташуйте одну під одною з урахуванням орієнтації відносно осцилограми напруги на вторинній обмотці трансформатора.

За осцилограмами з пп. 4.3.3 та пп. 4.3.5 зробіть висновки щодо характеру вихідної напруги досліджуваних схем випрямлення і значень зворотної напруги на діодах.

5.2 За даними таблиці 6.2 у одній системі координат побудуйте зовнішні характеристики однопівперіодного і мостового випрямлячів для різних типів фільтрів та мостового випрямляча з стабілізатором.

Аналізуючи побудовані характеристики, зробіть висновки про вплив на значення вихідної напруги випрямляча:

1) схеми випрямлення (типу вентильної схеми);

2) ємнісного фільтра;

3) індуктивного фільтра;

4) наявності у складі випрямляча стабілізатора.

5.3 За осцилограмами пп. 4.4.2 визначте розмах пульсацій напруги для кожного випадку і зробіть висновки про вплив типу фільтра на характер пульсацій і про вплив стабілізатора на їхнє значення.

5.4 За даними таблиці 6.2 у одній системі координат побудуйте зовнішні характеристики керованого випрямляча для різних кутів керування.

5.5. За даними таблиці 6.3 побудуйте регульовальну характеристику керованого випрямляча.

5.6. На основі аналізу осцилограм за пп. 4.5.2 і характеристик, побудованих за пп. 4.7.4 і 4.7.5, зробіть висновки про те, за рахунок чого здійснюється регулювання середнього значення вихідної напруги керованого випрямляча і чому регульовальна характеристика має нелінійний характер.

6 Пояснення до роботи

6.1 Випрямлячі

Електрична енергія централізовано, в основному, виробляється на змінному струмі.

В той же час споживання електричної енергії, за винятком теплових та освітлювальних установок, двигунів змінного струму та деяких інших застосувань, як правило, відбувається на постійному струмі: електричні двигуни постійного струму, технологічні процеси (наприклад, електроліз, зварювання), живлення електронних пристроїв (наприклад, вимірювальних, підсилюючих, обчислювальних, керуючих і т.п.).

Виходячи з цього, одним з основних видів перетворення електричної енергії є випрямлення.

Випрямлячем називають електротехнічний пристрій, призначений для перетворення енергії джерела напруги змінного струму в енергію напруги постійного струму.

Випрямляч зазвичай містить трансформатор, вентильну схему, згладжувальний фільтр, регулятор (стабілізатор). Навантаження також відносять до складу випрямляча, оскільки воно суттєво впливає на його роботу.

Трансформатор здійснює перетворення напруги мережі до необхідного для роботи випрямляча значення і забезпечує електричне (гальванічне) розділення первинного і вторинного кіл. Останнє забезпечує умови електричної безпеки за живлення.

Вентильна схема перетворює змінну напругу на випрямлену – в однополярну пульсуючу.

Згладжувальний фільтр виділяє з однополярної пульсуючої напруги постійну складову, чим забезпечує отримання власне напруги постійного струму.

Регулятор (стабілізатор) призначений для завдання на навантаженні необхідного значення напруги або його зміни за необхідним законом (наприклад, підтримки напруги на навантаженні на незмінному рівні) при змінах напруги мережі або змінах опору навантаження у заданих межах.

6.2 Однофазні схеми випрямлення

При потужності споживачів до декількох сотень ват випрямлення здійснюють за допомогою однофазних схем: однопівперіодної і двопівперіодних – з нульовим виводом і мостової.

Однопівперіодна схема і часові діаграми, що ілюструють її роботу, наведені на рисунку 6.3.

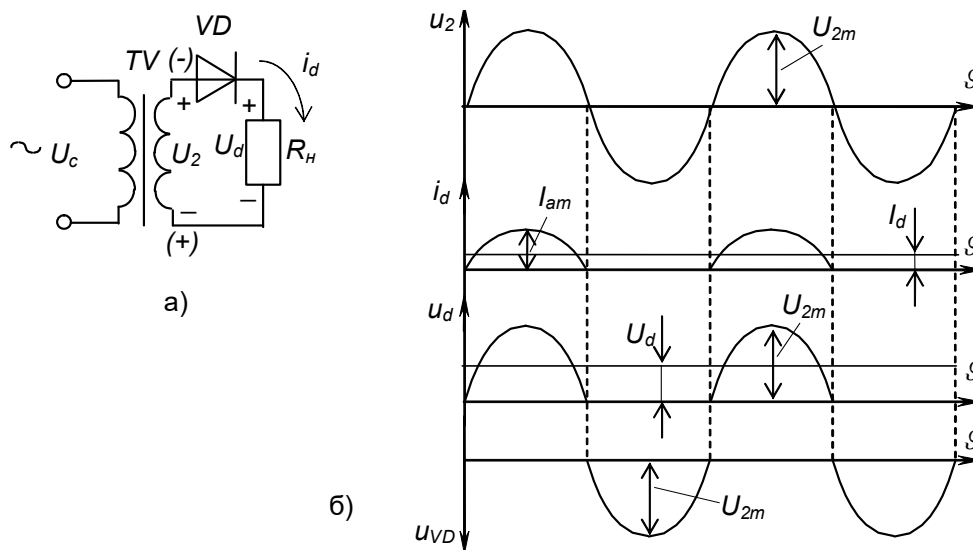


Рисунок 6.3 – Однофазний однопівперіодний випрямляч (а)
і часові діаграми його роботи (б)

Часові діаграми тут і надалі, як правило показують залежність відповідної величини від

$$\vartheta = \omega t, \quad (6.1)$$

де $\omega = 2\pi f_M$ – кругова частота;

f_M – частота мережі живлення;

t – час.

Струм у схемі протікає тільки при полярності напруги U_2 , зазначеної без дужок, коли діод VD відкритий. При протилежній полярності діод закритий, і вся напруга прикладається до нього.

Двопівперіодна схема випрямляча з нульовим виводом та часові діаграми його роботи наведені на рисунку 6.4.

Дана схема фактично являє собою об'єднання двох однопівперіодних схем випрямлення, одна з яких пропускає струм у навантаження при позитивній півхвилі напруги U_{21} , а інша – при негативній півхвилі напруги U_{22} . Оскільки число витків півобмоток однакове, то $U_{21} = U_{22}$. При цьому напрямок струму в навантаженні у обох випадках однаковий, а отже полярність пульсуючої напруги також однакова.

Максимальна зворотна напруга на закритому діоді дорівнює сумі амплітуд напруг U_{21} і U_{22} , тобто подвійній амплітуді напруги півобмотки трансформатора, оскільки коли один діод відкритий, а інший закритий, то останній виявляється підімкненим до двох півобмоток трансформатора.

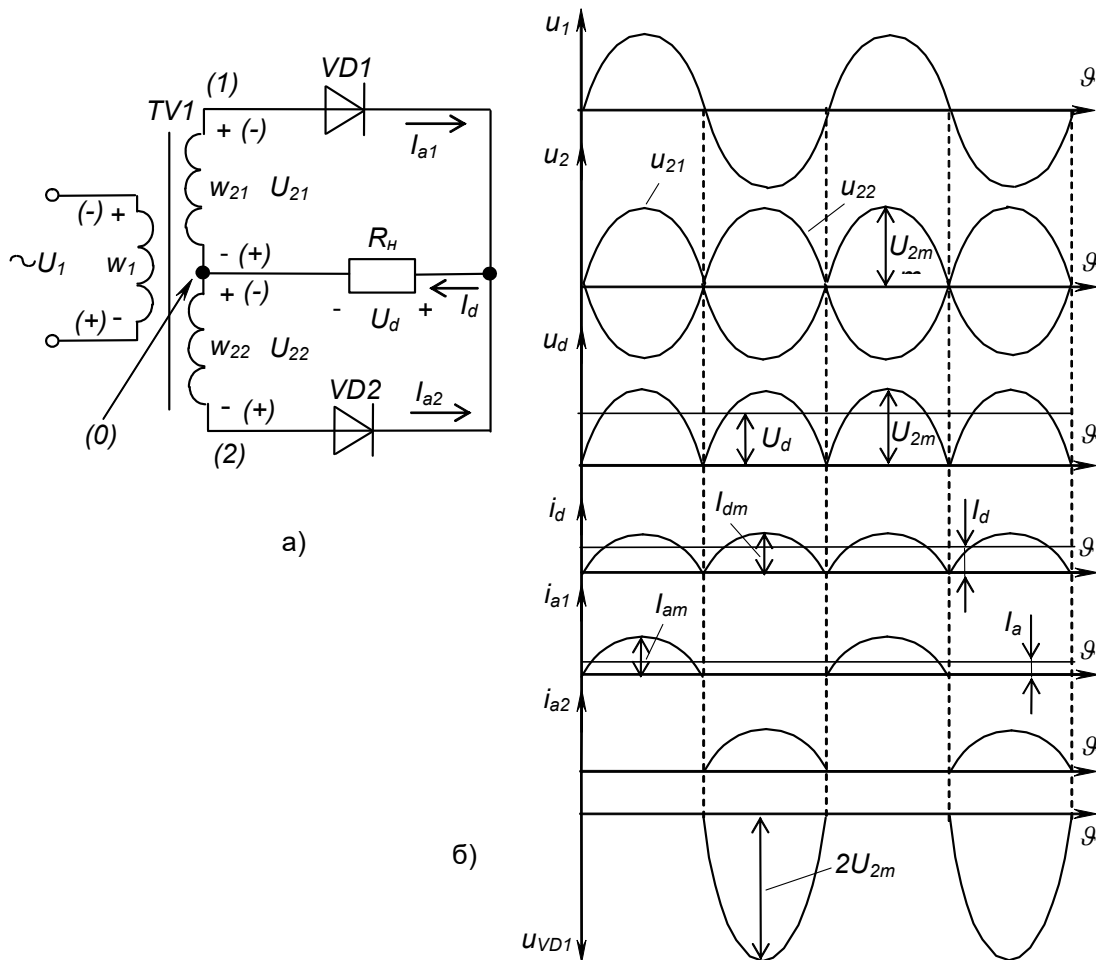


Рисунок 6.4 – Однофазний випрямляч з нульовим виводом (а) і часові діаграми його роботи (б)

Двопівперіодна мостова схема і часові діаграми, що пояснюють її роботу, наведені на рисунку 6.5

У цій схемі до однієї діагоналі утвореного діодами моста – діагоналі змінного струму – підімкнено вторинну обмотку трансформатора, а до іншої – діагоналі постійного струму – навантаження. Діоди VD1 і VD3 складають катодну групу, а VD2 і VD4 – анодну (за ознакою з'єднання разом однакових електродів).

За позитивної півхвилі напруги U_2 (полярність зазначена без дужок) струм протікає через діоди VD1 і VD4. До діодів VD2 і VD3 у цей час прикладена зворотна напруга, амплітудне значення якої дорівнює U_{2m} , тому що закритий діод (наприклад, VD2) через діод, що проводить струм (VD4), підмикається паралельно до вторинної обмотки трансформатора. За негативної півхвилі (полярність зазначена у дужках) струм проводять діоди VD2 і VD3, тобто у провідному стані в мостовому випрямлячі завжди знаходяться два діоди – один катодної групи і один анодної.

Основні показники однофазних схем випрямлення наведені в таблиці 6.4.

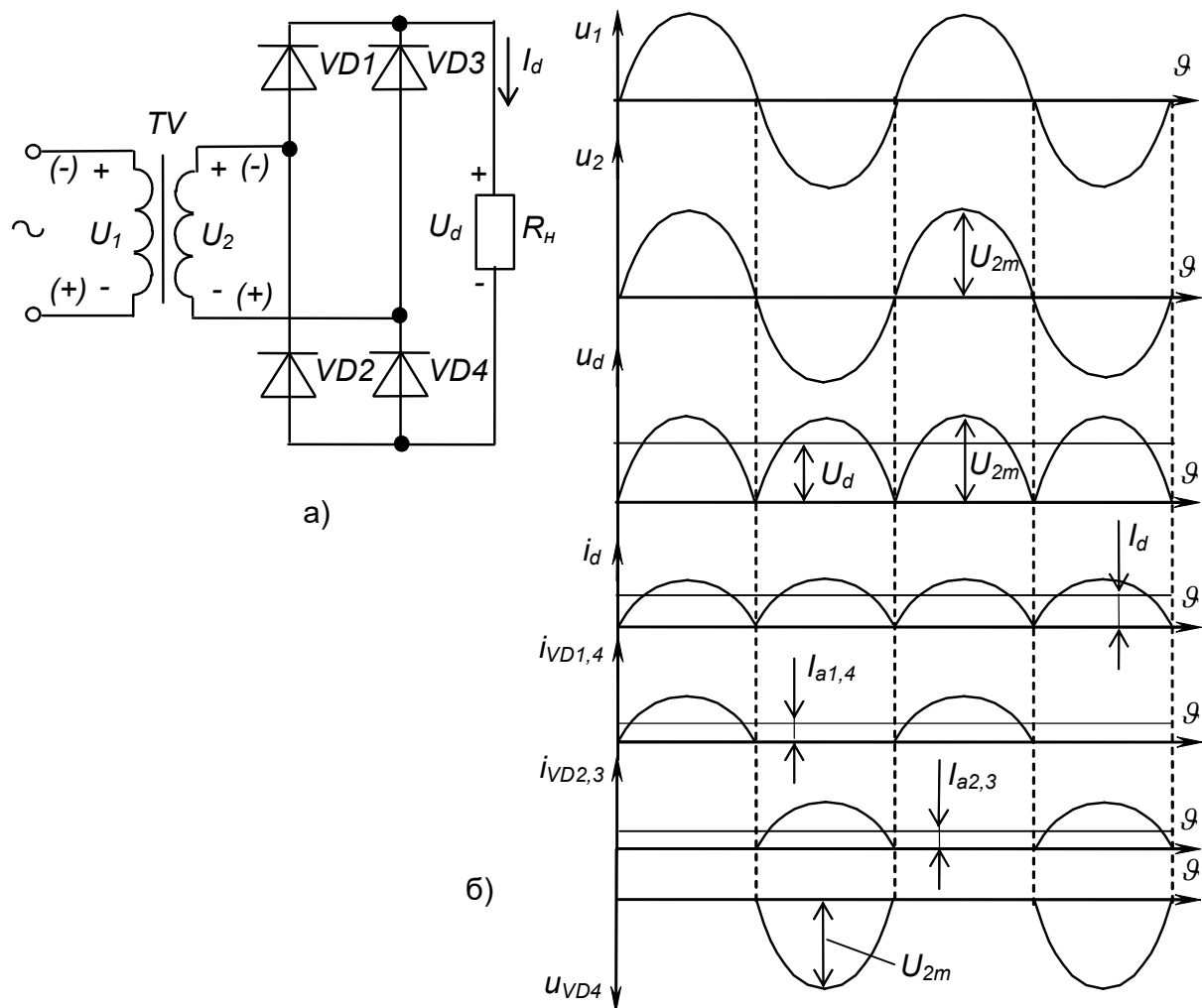


Рисунок 6.5 – Однофазний мостовий випрямляч (а)
і часові діаграми його роботи (б)

Порівняльний аналіз однофазних схем випрямлення показує:

1) однопівперіодна схема, у зв'язку з підвищеною габаритною потужністю трансформатора (бо його осердя підмагнічується через протікання струму у вторинній обмотці в одному напрямку протягом періоду) і значним коефіцієнтом пульсацій, застосовується тільки для живлення навантажень малої потужності – десятки міліват;

2) схема з нульовим виводом має кращі параметри вихідної напруги і два діоди, але трансформатор повинен мати вторинну обмотку, що складається з двох однакових півобмоток, і на закритий діод діє подвійна зворотна напруга;

3) мостова схема, що має чотири діоди і трансформатор з однією вторинною обмоткою, забезпечує ті ж параметри вихідної напруги, що й схема з нульовим виводом (оскільки габарити і вартість діодів невеликі, їхня подвоєна кількість не є істотним недоліком, окрім випадків випрямлення малих значень напруг – одиниці вольт, – коли істотно проявляється дія прямого падіння напруги на діодах).

Таблиця 6.4 – Основні показники однофазних схем випрямлення

Параметр		Схема випрямлення		
		однопів-періодна	двопів-періодна з нульовим виводом	двопів-періодна мостова
Відношення діючого значення напруги вторинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленої напруги	$\frac{U_2}{U_d}$	2,22	1,11	1,11
Відношення діючого значення струму вторинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_2}{I_d}$	1,57	0,785	1,11
Відношення середнього значення струму діода до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_a}{I_d}$	1,57	0,5	0,5
Відношення діючого значення струму первинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленого струму (n - коефіцієнт трансформації)	$\frac{I_1}{nI_d}$	1,21	1,11	1,11
Частота основної гармоніки пульсацій	$f_{(1)}$	f_M	$2f_M$	$2f_M$
Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги	$K_{n(1)}$	1,57	0,667	0,667
Габаритна потужність трансформатора	S_T	3,1	1,48	1,23
Наявність підмагнічування	–	є	немає	немає

6.3 Згладжувальні фільтри

Згладжувальний фільтр застосовується для згладжування пульсацій випрямленої напруги до рівня, необхідного для нормальної роботи навантаження.

При цьому коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги визначається як відношення амплітуди основної гармоніки пульсацій $U_{m(1)}$ до значення постійної складової

$$K_{n(1)} = \frac{U_{m(1)}}{U_d} . \quad (6.2)$$

Якість фільтра характеризується коефіцієнтом згладжування, що дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтра $K_{n(1)вх}$ до коефіцієнта пульсацій на його виході $K_{n(1)вих}$:

$$K_{32} = \frac{K_{n(1)ex}}{K_{n(1)вих}} . \quad (6.3)$$

Фільтри бувають пасивними (виконуються на пасивних елементах – резисторах, конденсаторах, дроселях) і активними (на транзисторах, операційних підсилювачах).

Пасивні фільтри використовують здатність індуктивностей і ємностей накопичувати енергію відповідно електричного та електромагнітного полів.

Індуктивні фільтри застосовуються у випрямлячах середньої і великої потужності, тому що забезпечують безперервність струму в схемі: у навантаженні, трансформаторі, діодах (бо відповідно до першого закону комутації струм у індуктивності не може змінюватися стрибком).

Схема індуктивного фільтра і часові діаграми його роботи при фільтрації двопівперіодної напруги наведені на рисунку 6.6.

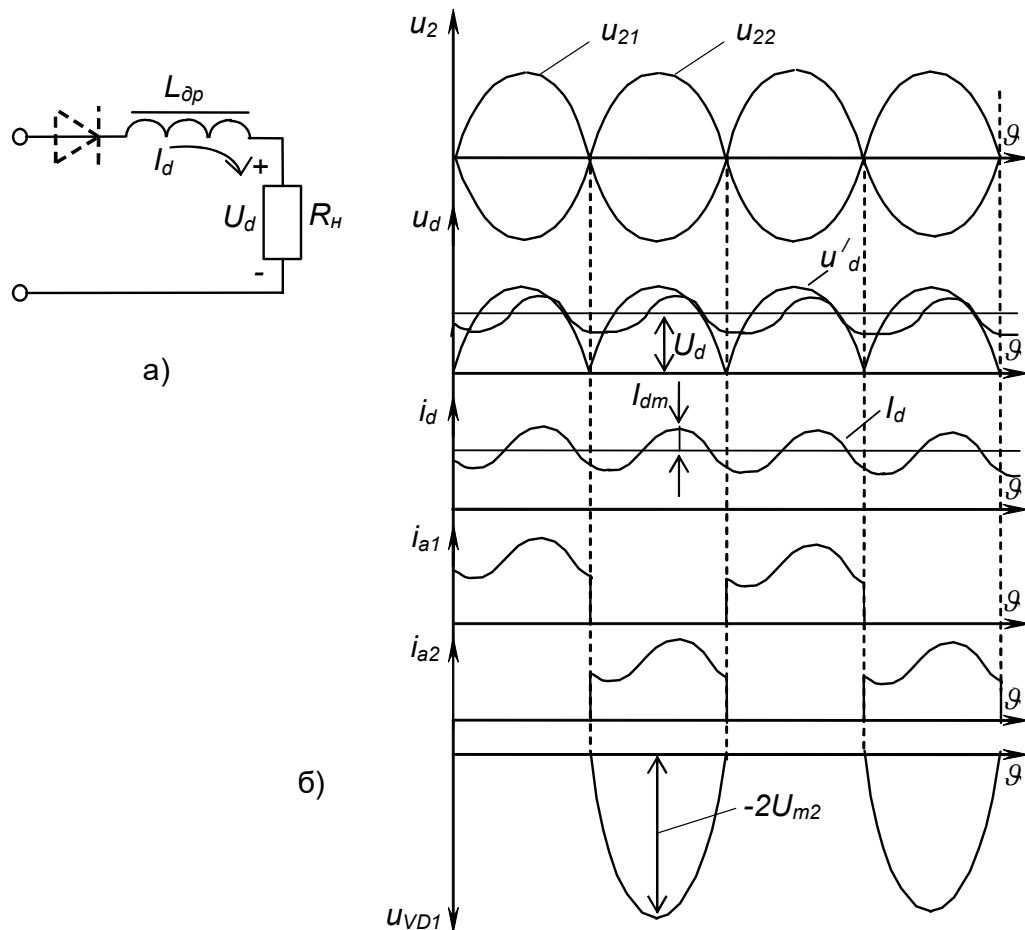


Рисунок 6.6 – Індуктивний фільтр (а) і часові діаграми роботи (б) однофазного двопівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром (з активно-індуктивним навантаженням)

Ефект фільтрації визначається тим, що індуктивність чинить опір гармонічним складовим пульсуючої випрямленої напруги, а постійній

складовій – ні. Дросель і активний опір навантаження утворюють частотнозалежний дільник напруги за умови, що опір дроселя змінній складовій пульсуючого струму з найнижчою частотою $X_L = \omega_n L$ (активний опір у ідеального дроселя відсутній) значно перевищує активний опір навантаження R_n . Змінні складові напруги діляться між R_n і X_L так, що в основному падають на X_L , а постійна складова вся прикладається до R_n .

Отже для ефективного згладжування необхідним є виконання умови:

$$X_L = \omega_n L \gg R_n, \quad (6.4)$$

де $\omega_n = 2\pi f_n$.

У якості індуктивності в випрямлячах використовують дроселі – котушки індуктивності з магнітним осердям, що має повітряний зазор, який запобігає насиченню магнітопроводу.

Ємнісний фільтр – це конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню. Його схема і часові діаграми роботи наведені на рисунку 6.7.

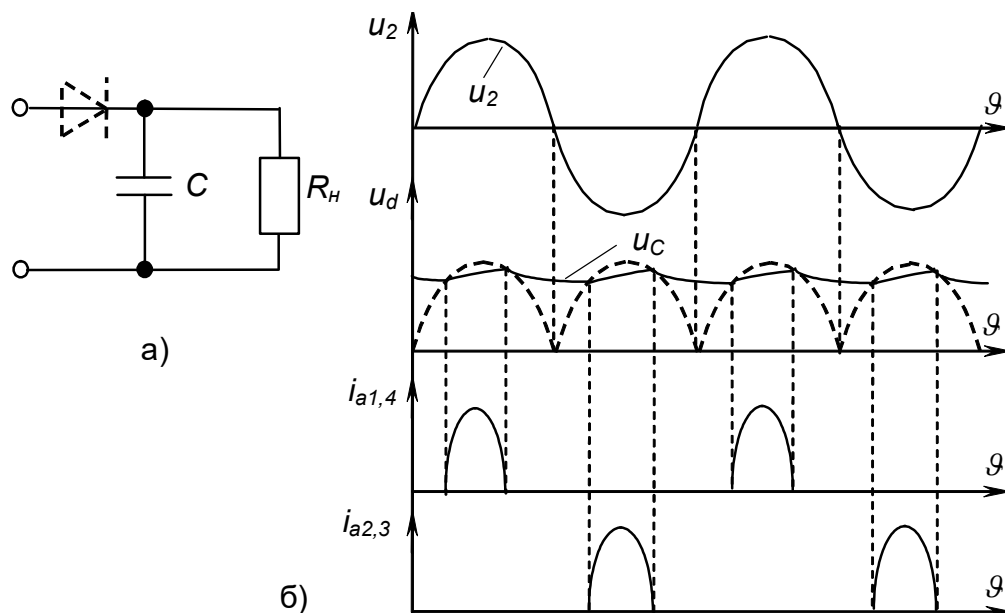


Рисунок 6.7 – Ємнісний фільтр (а) і часові діаграми роботи (б) мостового випрямляча з ємнісним фільтром (з активно-ємнісним навантаженням)

За умови, що опір конденсатора X_C для складової пульсуючого струму з найнижчою частотою значно менший за опір навантаження R_n , забезпечується шунтування навантаження за змінним струмом: оскільки конденсатор і активний опір навантаження утворюють частотнозалежний дільник струму, постійний струм увесь протікає через R_n (конденсатор постійного струму не проводить), а змінні складові розподіляються між R_n і X_C . Для ефективного згладжування необхідним є виконання умови:

$$X_C = \frac{1}{\omega_n C} \ll R_H . \quad (6.5)$$

Заряд конденсатора відбувається у проміжки часу, коли напруга вторинної обмотки перевищує напругу на конденсаторі (протікає струм через відповідні вентилі). Якщо вона нижче, то навантаження живиться енергією, що запасена в ємності (конденсатор розряджається).

Струм заряду, значення якого обмежується лише опором елементів схеми випрямлення, має пульсуючий характер, що несприятливо як для діодів і трансформатора, так і для мережі живлення. Тому ємнісні фільтри застосовуються при малих струмах навантаження. Іноді, щоб обмежити кидки струму, у коло заряду включають опір $R = (0,2 - 0,3)R_H$.

Слід також зазначити, що чим більша постійна часу розряду конденсатора $\tau = CR_H$, тим вище середнє значення випрямленої напруги, що наближається до величини $U_{dXX} = \sqrt{2}U_2$.

Для підвищення якості фільтрації і поліпшення умов роботи випрямляча застосовують Г-подібні LC-фільтри, що виконуються за схемою, зображеною на рисунку 6.8 ,а.

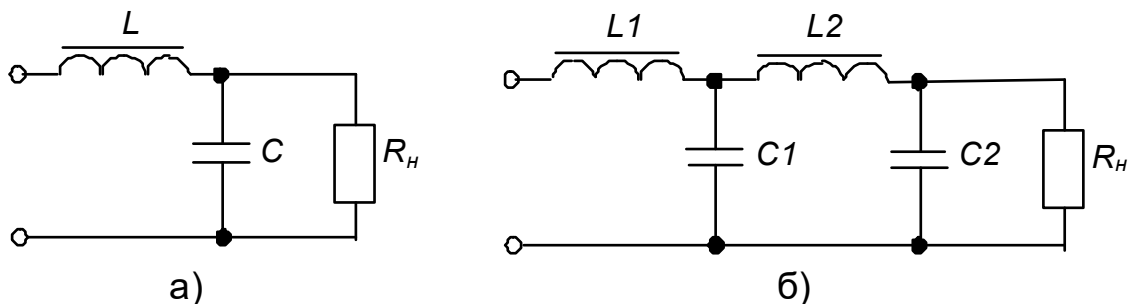


Рисунок 6.8 – Г-подібні LC-фільтри: одноланковий (а) і дволанковий (б)

Тут конденсатор знижує опір навантаження за змінним струмом, а індуктивність, окрім фільтрації, забезпечує і безперервність струму.

Для одержання кращого згладжування випрямленої напруги при забезпеченні прийнятних значень параметрів елементів фільтра застосовують багатоланкові фільтри, що являють собою послідовне вмикання простих фільтрів (ланок). Коефіцієнт згладжування багатоланкового фільтра дорівнює добутку коефіцієнтів згладжування ланок. Прикладом багатоланкового фільтра може бути П-подібний CLC-фільтр, зображений на рисунку 6.8, б. Він являє собою послідовне вмикання ємнісного фільтра і Г-подібного LC-фільтра.

Для забезпечення високих масогабаритних показників за малої потужності застосовують активні фільтри, у яких дія реактивних елементів посилюється транзисторними або операційними підсилювачами.

6.4. Компенсаційний стабілізатор напруги

Стабілізатори призначені для підтримання значення напруги на навантаженні випрямляча на незмінному рівні при змінах напруги мережі, опору навантаження у заданих межах і дії інших дестабілізуючих факторів.

Стабілізатори поділяються на параметричні, де використовується ефект незмінності напруги в деяких видах електронних приладів при зміні струму, що протікає через них, (наприклад, стабілітрон), і компенсаційні, у яких стабілізація забезпечується за рахунок замкненої автоматичної системи регулювання з негативним зворотним зв'язком, коли, наприклад, опір керованого нелінійного елемента, включеного послідовно або паралельно навантаженню, змінюється за допомогою спеціальної схеми слідкування.

Частіше застосовуються послідовні стабілізатори, як більш економічні. Структурна схема такого стабілізатора зображена на рисунку 6.9.

Тут струм навантаження I_H дорівнює струму регулюючого елемента PE , а напруга на навантаженні U_H дорівнює різниці напруги U_d і падіння напруги на PE U_{PE} . Завдяки зміні системою керування СК значення U_{PE} підтримується сталість U_H :

$$U_H = U_d - U_{PE}. \quad (6.6)$$

Ефективність роботи стабілізатора визначається коефіцієнтом стабілізації, що дорівнює відношенню відносної зміни напруги на вході стабілізатора до відносної зміни напруги на його виході:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_d}{U_d} : \frac{\Delta U_H}{U_H}, \quad (6.7)$$

де ΔU_d і ΔU_H – абсолютні зміни входної і вихідної напруг відповідно.

Одна з можливих схем компенсаційного стабілізатора наведена на рисунку 6.10.

У якості PE тут використано біполярний транзистор $VT1$, увімкнений за схемою з СК із зміщенням фіксованим струмом через резистор R_1 .

Елементи R_2 і $VD1$, що являють собою параметричний стабілізатор, є джерелом опорної (еталонної) напруги U_{on} .

Резистори $R_3 - R_5$ утворюють дільник вихідної напруги, що є джерелом напруги зворотного зв'язку $U_{зз}$.

Транзистор $VT2$ є пристроєм порівняння і підсилювачем сигналу неузгодженості, що дорівнює різниці напруг $U_{зз}$ і U_{on} .

Працює стабілізатор наступним чином.

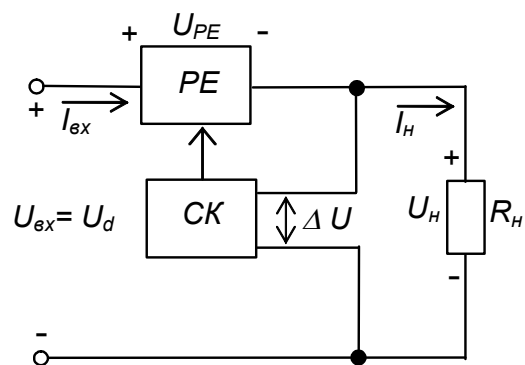


Рисунок 6.9 – Структурна схема компенсаційного стабілізатора послідовного типу

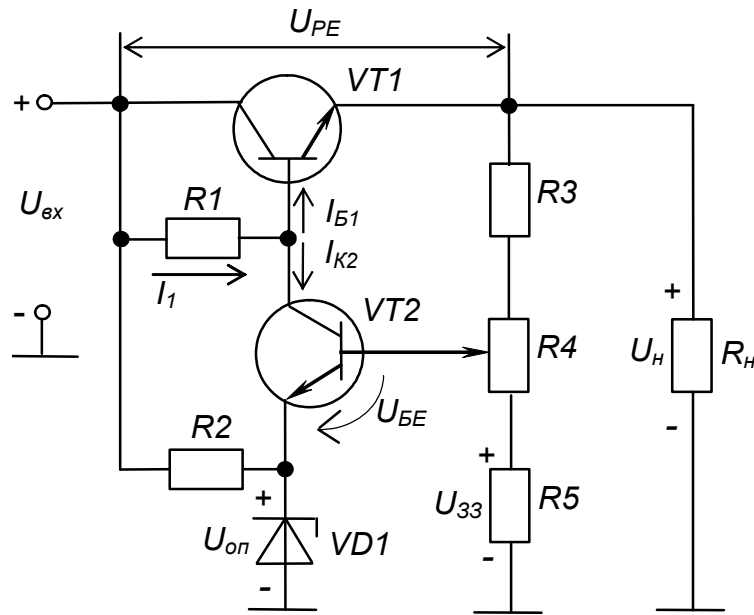


Рисунок 6.10 – Компенсаційний стабілізатор послідовного типу з регульованою вихідною напругою

Наприклад, при збільшенні $U_d = U_{вх}$ починає збільшуватися U_n , а виходить, і U_{33} . Це призводить до збільшення напруги розузгодження

$$U_{BE} = U_{33} - U_{оп} , \quad (6.8)$$

транзистора, що є керуючим для, $VT2$. Через це $VT2$ сильніше відкривається, збільшується його колекторний струм I_{K2} і більша частина струму I_1 , що тече через резистор R_1 , відгалужується у $VT2$. Струм бази транзистора $VT1$

$$I_B = I - I_K \quad (6.9)$$

зменшується і транзистор $VT1$ призакривається, тобто падіння напруги на ньому $U_{KE} = U_{PE}$ збільшується. У результаті, напруга на навантаженні згідно з (6.6) наближається до попереднього значення.

При зменшенні U_d відбуваються зворотні процеси, що також змушує U_n повернутися до попереднього значення.

Напруга на навантаженні визначається значенням еталонної напруги $U_{оп}$ і може регулюватися зміною напруги U_{33} при використанні, наприклад, у якості R_4 резистора змінного опору.

У наш час широко поширені стабілізатори у інтегральному виконанні. Крім елементів, що забезпечують стабільність вихідної напруги, вони містять також елементи захисту від перевантаження, короткого замикання та перегріву корпусу.

6.5 Зовнішня (навантажувальна) характеристика випрямляча

Через наявність опору обмоток трансформатора R'_T (у розрахунках приводиться до вторинної сторони), опору провідників, що з'єднують елементи, R_{np} і опору діодів R_D вихідна напруга випрямляча знижується зі збільшенням струму навантаження.

Це відображає зовнішня характеристика випрямляча:

$$U_d = U_{dXX} - I_d(R'_T + R_{np} + R_D), \quad (6.10)$$

де U_{dXX} – середнє значення випрямленої напруги у режимі холостого ходу;

I_d – середнє значення струму навантаження.

Зовнішні характеристики випрямлячів різного типу наведено на рисунку 6.11.

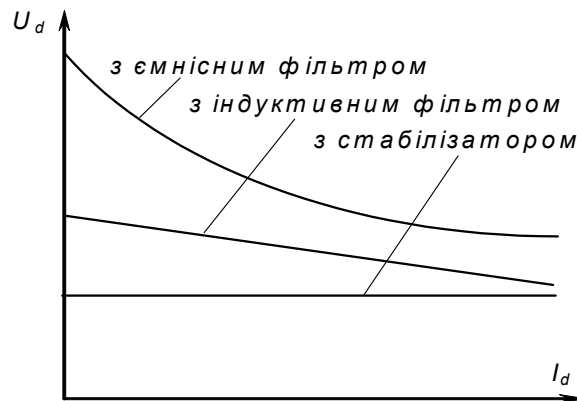


Рисунок 6.11 – Зовнішні характеристики випрямлячів

6.6 Керовані випрямлячі

Можливість зміни постійної напруги на навантаженні за необхідним законом або стабілізація її значення може бути реалізована за допомогою керованих випрямлячів, що будуються на вентилях, які дозволяють за сигналами керування змінювати свої параметри, наприклад, на тиристорах.

Тиристором називають багатошаровий електронний прилад, який може знаходитися у двох станах: закритому і відкритому.

Перевести тиристор із закритого стану у відкритий можна, пропустивши по колу керуючий електрод – катод струм керування $i_{кер}$ за наявності на тиристорі прямої напруги. За рахунок дії внутрішнього позитивного зворотного зв'язку достатній для відкриття тиристора час протікання струму керування складає мікросекунди.

З відкритого стану у закритий тиристор переходить, якщо до нього на деякий час (сотні мікросекунд) прикласти зворотну напругу або зменшити струм, що протікає через нього, нижче значення, називаного струмом утримання. Струм у колі керування при цьому повинен бути відсутнім.

Принцип дії керованого випрямляча розглянемо на прикладі однофазного випрямляча з нульовим виводом, схема і часові діаграми, що пояснюють його роботу, зображені на рисунку 6.12.

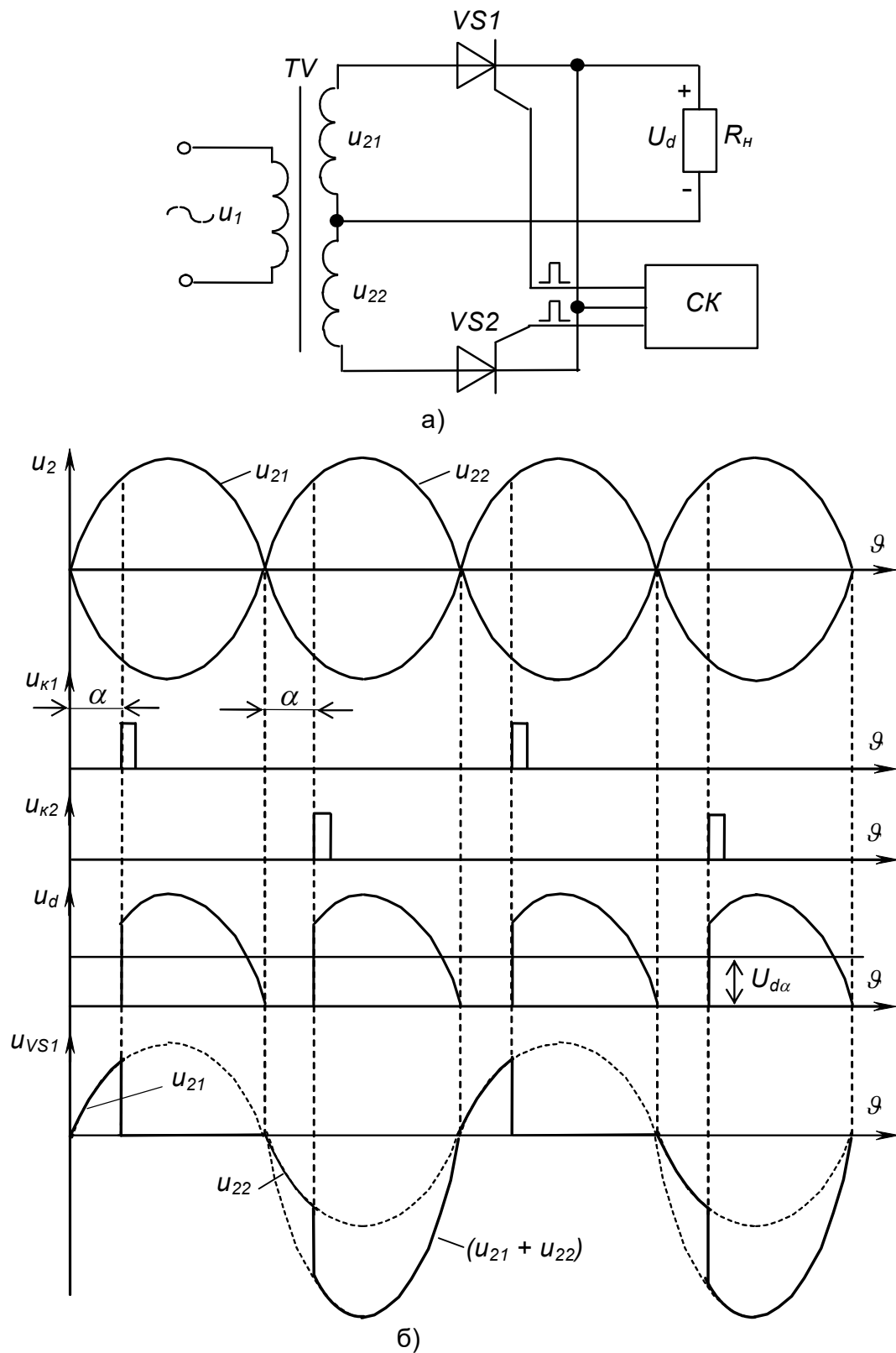


Рисунок 6.12 – Однофазний двопівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом (а) та часові діаграми його роботи (б)

Принцип регулювання полягає у задаванні регульованої затримки на вмикання тиристорів випрямляча відносно моменту природного переходу напруги мережі живлення через нуль. Ця затримка вимірюється кутом α , що називається кутом керування.

Тиристири $VS1$ і $VS2$ за допомогою схеми керування СК по черзі підмикають навантаження до півобмоток трансформатора TV .

При $\alpha = 0$ маємо нерегульований режим;
 при $\alpha = \pi$ тиристор закритий і $U_d = 0$;
 при $0 < \alpha < \pi$ напруга на навантаженні становить

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m}(\sin \omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha) . \quad (6.10)$$

Таким чином, змінюючи значення α , регулюють середнє значення вихідної напруги U_d .

Регульовальну характеристику випрямляча зображено на рисунку 6.13.

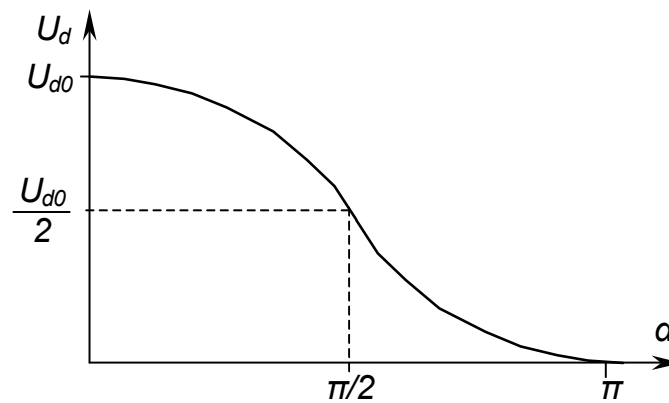


Рисунок 6.13 – Регульовальна характеристика керуваного випрямляча

Вона нелінійна, тому що лінійна зміна α викликає нелінійні зміни площі під кривою синусоїди.

Керовані випрямлячі на тиристорах безінерційні, мають високий к.к.д. (тому що на відміну, наприклад, від компенсаційного стабілізатора надлишок потужності при регулюванні не виділяється на регулюючому елементі у вигляді тепла, а просто не береться з мережі), добре працюють у автоматичному режимі при керуванні від зовнішніх пристроїв.

Їхнім недоліком є значне викривлення форми вихідної пульсуючої напруги, що веде до збільшення габаритів і маси фільтрів і вимагає додаткового встановлення вхідних фільтрів для виключення впливу на мережу живлення за рахунок імпульсного споживання струму.

Керовані випрямлячі застосовуються для створення потужних регульованих джерел постійної напруги, що використовуються для різних цілей: стабілізаторів, терморегуляторів, світлорегуляторів, регуляторів швидкості обертання електродвигунів постійного струму та ін.

Контрольні запитання

1. *Вкажіть призначення і склад випрямляча.*
2. *Назвіть схеми випрямлення, що досліджуються у даній роботі, і поясніть принцип дії кожної з них.*
3. *Проведіть порівняльний аналіз однофазних схем випрямлення.*
4. *Вкажіть призначення, основні параметри й види згладжувальних фільтрів.*
5. *Наведіть схему і поясніть принцип дії індуктивного фільтра.*
6. *Наведіть схему і поясніть принцип дії ємнісного фільтра.*
7. *Наведіть схему і поясніть принцип дії Г-подібного LC-фільтра.*
8. *Вкажіть призначення стабілізаторів напруги і поясніть принцип роботи параметричного і компенсаційного стабілізаторів.*
9. *Наведіть схему компенсаційного стабілізатора напруги і поясніть принцип його дії.*
10. *Поясніть, що показує зовнішня характеристика випрямляча і як впливає на її вид склад випрямляча?*
11. *Поясніть, що таке тиристор, яким чином здійснюють керування ним.*
12. *Наведіть схему і поясніть принцип дії керованого випрямляча.*
13. *Поясніть, що показує регульовальна характеристика регульованого випрямляча і який вигляд вона має.*
14. *Поясніть, у чому полягає відмінність принципів регулювання вихідної напруги в компенсаційному стабілізаторі й у керованому випрямлячі.*

Лабораторна робота №7
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ
І ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА

1 Мета роботи

1. Дослідження трифазних схем випрямлення.
2. Дослідження однофазного автономного інвертора струму.

2 Обладнання

1. Стенд лабораторний №7.
2. Осцилограф С1-68.

3 Зміст роботи

1. Дослідити трифазну схему випрямлення з нульовим виводом (схему Міткевича) при роботі на активне навантаження.
2. Дослідити трифазну мостову схему випрямлення (схему Ларіонова) при роботі на активне навантаження.
3. Дослідити однофазний автономний інвертор струму з нульовим виводом при роботі на активне навантаження.

4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомтесь з робочим місцем і приладами.
- 4.2 Увімкніть осцилограф і живлення стенда лабораторного.
- 4.3 Дослідження схеми Міткевича
 - 4.3.1 Дослідження виконуйте за допомогою схеми, наведеної на рисунку 7.1 (мнемосхема на лівій половині стенда лабораторного).

Перемикач «Род работы» встановіть у положення «Сх. Миткевича».
 - 4.3.2 Зніміть дані для побудови зовнішньої характеристики випрямляча і розрахунку його параметрів. Для цього тумблери SB1-SB8 «Нагрузка» встановіть у відключене положення. Після чого, переводячи тумблери у ввімкнене положення згідно з таблицею 7.1, збільшуйте струм навантаження від нуля до максимального значення. Показання вимірювальних приладів, встановлених на лицьовій панелі стенда лабораторного, занесіть у таблицю 7.1.

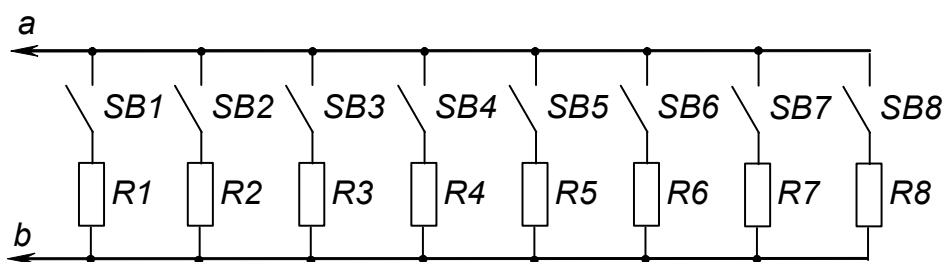
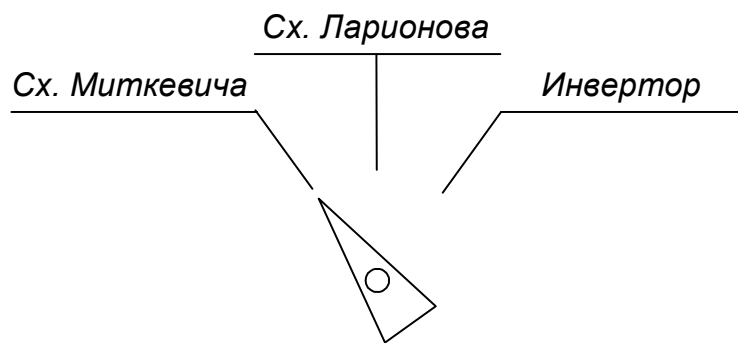
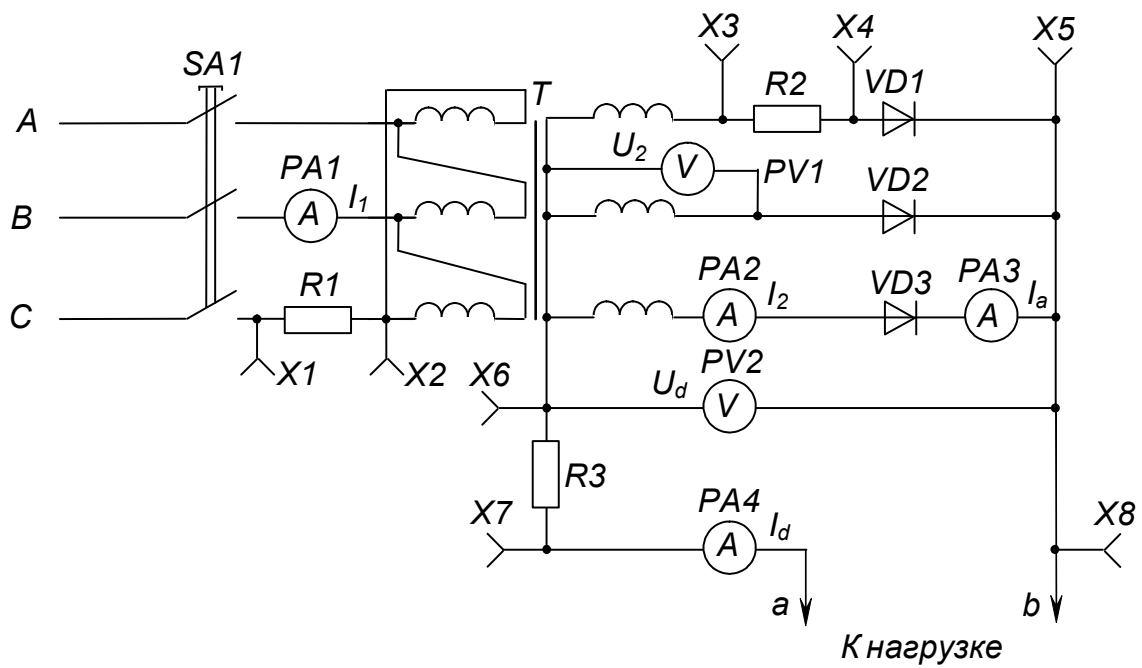


Рисунок 7.1 – Схема для дослідження трифазного випрямляча з нульовим виводом (схеми Міткевича)

Таблиця 7.1 – Експериментальні дані схеми Міткевича

Кількість ввімкнених тумблерів	0	1	2	3	4	5	6	7	8
U_2 , В									
U_d , В									
I_1 , А									
I_2 , А									
I_a , А									
I_d , А									

Примітка. У таблиці 7.1 позначені:

U_2 – діюче значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора (вимірюється вольтметром $PV1$);

U_d – середнє значення напруги на навантаженні випрямляча (вимірюється вольтметром $PV2$);

I_1 – діюче значення лінійного струму первинної обмотки трансформатора (вимірюється амперметром $PA1$);

I_2 – діюче значення фазного струму вторинної обмотки трансформатора (вимірюється амперметром $PA2$);

I_a – середнє значення струму через діод (вимірюється амперметром $PA3$);

I_d – середнє значення струму навантаження (вимірюється амперметром $PA4$).

4.3.3 Зніміть осцилограми напруг і струмів (тумблери $SB1$ – $SB8$ увімкніть) у схемі випрямляча (перемикач вибору виду синхронізації осцилографа встановіть у положення «*Сеть*», тут і надалі при виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлюйте у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення):

1) фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора, підімкнувши сигнальний кабель осцилографа нульовим проводом до клеми $X6$, а сигнальним до $X3$ (перемикач осцилографа «*Усилитель Y*» встановіть орієнтовно у положення « 1 В/см », а множник підсилення по вертикалі рівним « $\times 10$ »);

2) напруги на навантаженні, підімкнувши кабель осцилографа до клем $X7$ і $X8$ відповідно;

3) напруги на діоді – клеми $X5$ і $X4$ відповідно;

4) струму вторинної обмотки трансформатора – клеми $X4$ і $X3$ відповідно (перемикач осцилографа «*Усилитель Y*» встановіть орієнтовно у положення « 10 мВ/см », бо як датчики струму використовуються шунти – у даному випадку це резистор $R2$ з опором у десяти долі ома);

5) струму навантаження – клеми $X6$ і $X7$ відповідно.

4.4 Дослідження схеми Ларіонова

4.4.1 Дослідження робіть за допомогою схеми, зображеної на рисунку 7.2 (верхня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного). Перемикач «Род роботи» встановити у положення «Сх. Ларіонова».

4.4.2 Зніміть дані для побудови зовнішньої характеристики випрямляча і розрахунку його параметрів відповідно до методики пп. 4.3.2. Показання вимірювальних приладів занесіть в таблицю, аналогічну таблиці 7.1.

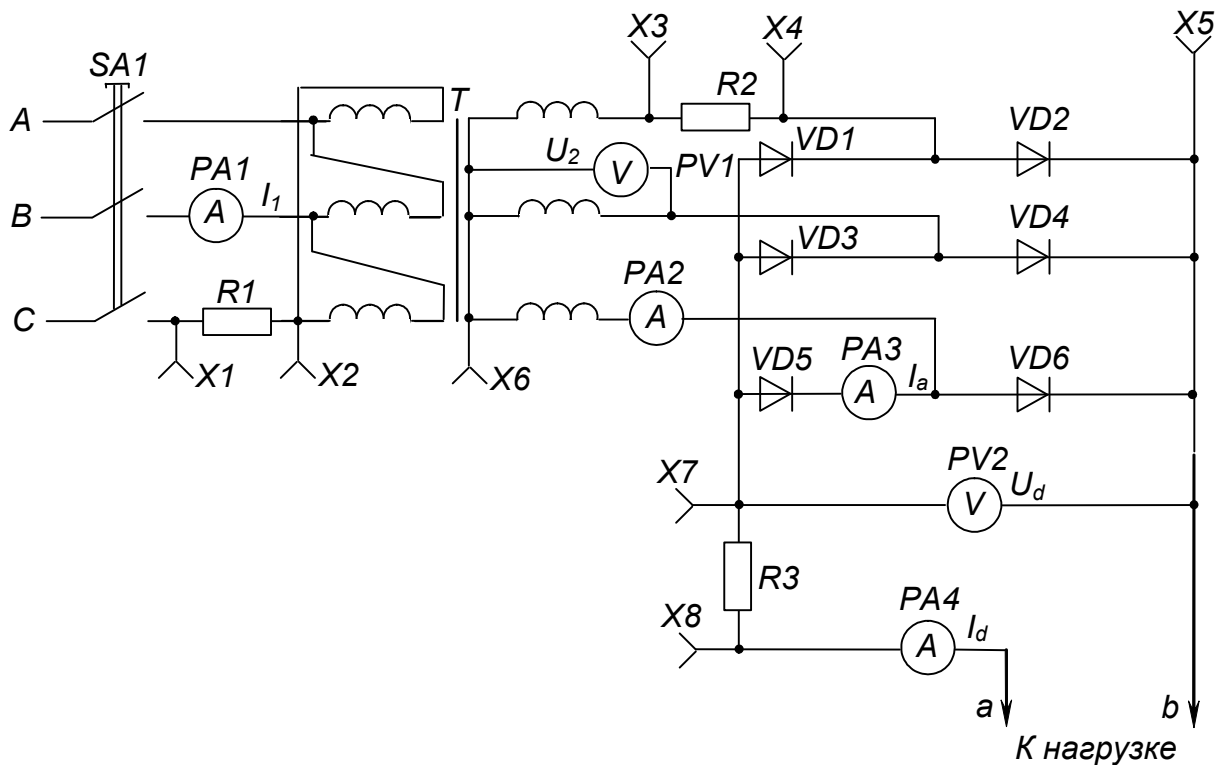


Рисунок 7.2 – Схема для дослідження трифазного мостового випрямляча (схеми Ларіонова)

4.4.3 Зніміть осцилограми напруг і струмів у схемі випрямляча аналогічно методиці пп. 4.3.4, підмикаючи нульовий і сигнальний проводи сигнального кабелю осцилографа відповідно до клем:

- 1) X6–X3 (фазна напруга);
- 2) X8–X5 (напруга на навантаженні);
- 3) X5–X4 (напруга на діоді);
- 4) X4–X3 (струм вторинної обмотки);
- 5) X7–X8 (струм навантаження).

4.5 Дослідження інвертора

4.5.1 Дослідження робіть за допомогою схеми, зображеної на рисунку 7.3 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного). Перемикач «Род работы» встановити у положення «Інвертор».

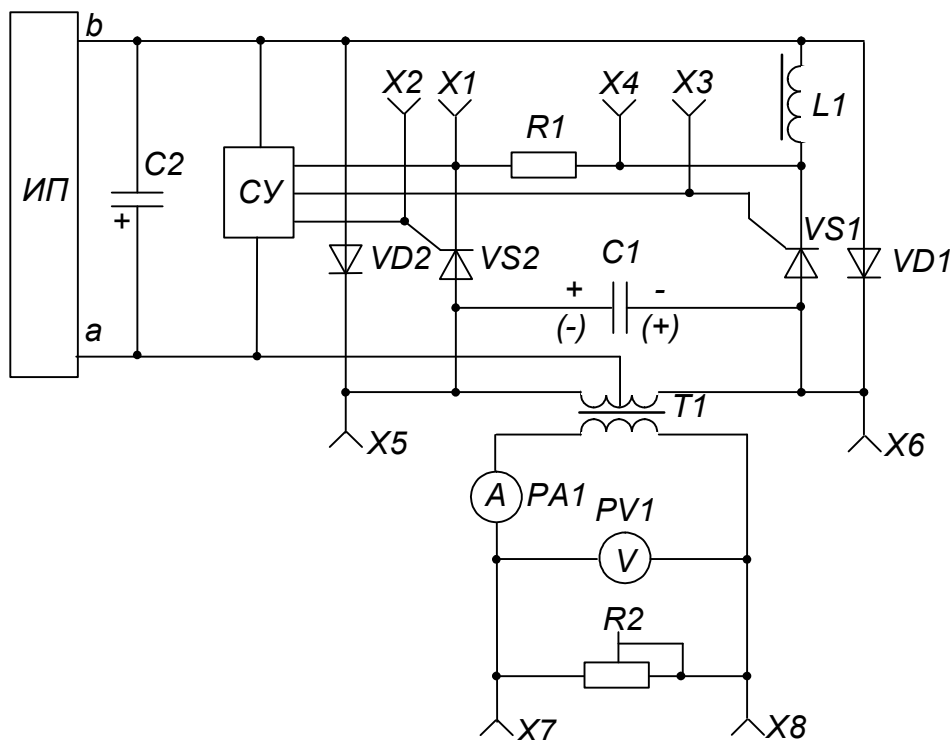


Рисунок 7.3 – Схема для дослідження однофазного автономного інвертора струму

4.5.2 Зніміть осцилограми напруг і струму в схемі інвертора, підмикаючи нульовий і сигнальний проводи сигнального кабелю осцилографа відповідно до клем (перемикач вибору виду синхронізації осцилографа встановити у положення «Внутр.»):

1) X4–X3 – імпульси керування тиристора *VS1* (перемикач осцилографа «Усиление» встановити орієнтовно у положення «0,2 В/см», а масштаб – « $\times 10$ »);

2) X1–X2 – імпульси керування тиристора *VS2*;

3) X8–X7 – напруга на навантаженні (перемикач *Усиление Y* – орієнтовно у положенні «1 В/см»);

4) X6–X5 – напруга на комутуючому конденсаторі («Усиление Y» – «2 В/см»);

5) X1–X5 – напруга на тиристорі *VS2*;

6) X4–X1 – струм через тиристор *VS2* («Усиление Y» – орієнтовно «20 мВ/см»).

4.6 Виключіть осцилограф і живлення стенда лабораторного.

Наведіть порядок на робочому місці.

5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиць пп. 4.3.2 і пп. 4.4.2 в одній системі координат побудуйте зовнішні характеристики випрямлячів $U_d = f(I_d)$. Зробіть висновки про значення і характер зміни напруги.

5.2 За даними пп. 4.3.2 і пп. 4.4.2 виконайте розрахунки і результати занесіть у таблицю 7.2. Виконайте порівняльний аналіз показників трифазних схем випрямлення.

Таблиця 7.2 – Результати розрахунку показників трифазних схем випрямлення

Схема випрямлення	Відношення	Кількість увімкнених тумблерів			
		0	2	4	8
Міткевича	U_2/U_d				
	I_1/I_d				
	I_2/I_d				
	I_a/I_d				
Ларіонова	U_2/U_d				
	I_1/I_d				
	I_2/I_d				
	I_1/I_d				

5.3 Осцилограми напруг і струмів для кожного випрямляча розташовуйте одну під одною з урахуванням орієнтації відносно фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора, а для інвертора – відносно імпульсів керування тиристора $VS1$.

5.4 Для кожного випрямляча за осцилограмами зробіть висновок про значення вихідної напруги і частоту її пульсацій, про максимальне значення зворотної напруги на діоді, форму струму вторинної обмотки трансформатора.

5.5 Для інвертора за осцилограмами зробіть висновок про форму вихідної напруги, струму через тиристор, напруги на комутуючому конденсаторі.

6 Пояснення до роботи

6.1 Трифазні схеми випрямлення

Для живлення навантажень середньої і великої потужності використовують трифазні схеми випрямлення, що порівняно з однофазними мають ряд переваг: суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій, а отже більш ефективне використання згладжуючих фільтрів, ефективне використання габаритної потужності трансформатора, краще використання вентилів за струмом.

Найрозповсюдженішими з трифазних схем випрямлення є однопівперіодна з нульовим виводом (схема Міткевича) та двопівперіодна мостова (схема Ларіонова).

6.1.1 Схема Міткевича

Схема Міткевича і часові діаграми, що пояснюють її роботу, зображені на рисунку 7.4.

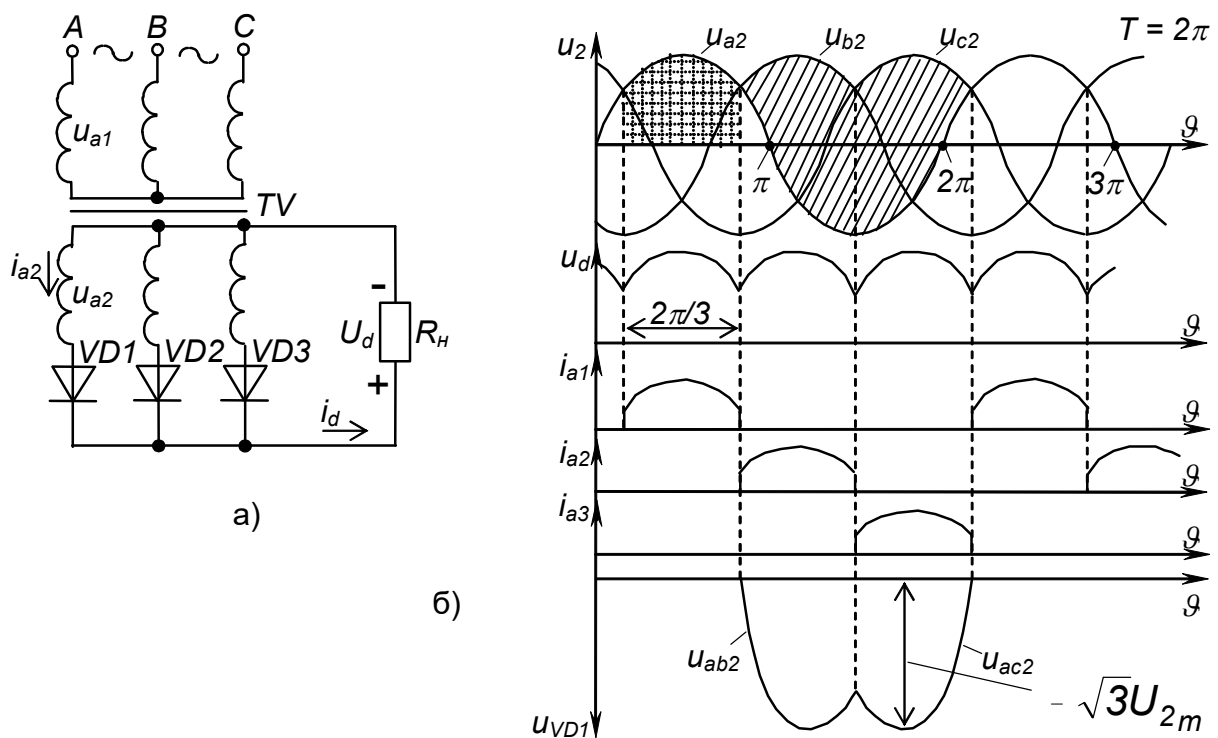


Рисунок 7.4 – Трифазна схема з нульовим виводом (схема Міткевича)

Первинна обмотка трансформатора в цій схемі може бути з'єднана у зірку або трикутник, а вторинна – тільки у зірку, оскільки ця схема фактично являє собою три увімкнені паралельно однофазні однопівперіодні схеми, що працюють на спільне навантаження. При цьому е.р.с. e_{2a} , e_{2b} і e_{2c} мають напруги синусоїдної форми, що синхронно змінюються за часом і мають взаємне зміщення на кут $2\pi/3$ (тобто на 120°).

Аноди вентилів підімкнені до виводів вторинної обмотки трансформатора, а катоди з'єднані разом і утворюють позитивний полюс випрямляча. Негативним полюсом є нульовий вивід трансформатора (див. рис. 7.4, а).

В результаті, у кожен момент часу через навантаження протікає струм, що визначається фазою з найбільш позитивною напругою.

Як видно з часових діаграм, зображених на рисунку 7.4, б, напруга на навантаженні u_d і струм, що протікає через неї, i_d мають пульсуючий характер. Частота пульсації випрямленої напруги у три рази перевищує частоту мережі.

Недоліком схеми Міткевича є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора. Воно зумовлене тим, що, як і у будь-якої однофазної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період протікає лише один раз і у одному напрямку, тобто має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу – з завищеною габаритною потужністю.

Кожний діод у цій схемі працює одну третину періоду, тому середній струм через нього I_a складає третину значення середнього випрямленого струму навантаження I_d .

У закритому стані потенціал анода діода у кожен момент часу визначається напругою своєї фази, а потенціал катода – напругою фази, що живить навантаження, тобто до нього прикладається лінійна напруга, максимальне значення якої становить:

$$U_{VD\ m} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_2 = 2,09 U_d. \quad (7.1)$$

Основні параметри схеми Міткевича при роботі на активне навантаження наведені у таблиці 7.3.

6.1.2 Схема Ларіонова

Схема Ларіонова і часові діаграми, що пояснюють її роботу, зображені на рисунку 7.5.

Первинна і вторинна обмотки трансформатора у цій схемі можуть з'єднуватися як у зірку, так і в трикутник. Тут шість випрямних діодів, увімкнених в трифазну мостову схему, утворюють дві групи: анодну ($VD1$, $VD2$, $VD3$) і катодну ($VD4$, $VD5$, $VD6$) – див. рис. 7.5, а.

Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів. Можна виділити три однофазних мости, підімкнених до відповідних лінійних вторинних напруг і паралельно до навантаження.

В провідному стані у схемі Ларіонова завжди знаходяться два діоди: один із анодної групи і один з катодної. Струм протікає від фази з найбільш позитивною на даний момент напругою до фази із найбільш негативною напругою. Тобто, як видно з рис. 7.5, б, потенціал з'єднаних катодів (плюс випрямляча) змінюється за верхньою огинаючою синусоїд, а потенціал з'єднаних анодів (мінус випрямляча) – за нижньою. Отже, струм навантаження у даній схемі тече під дією лінійної напруги.

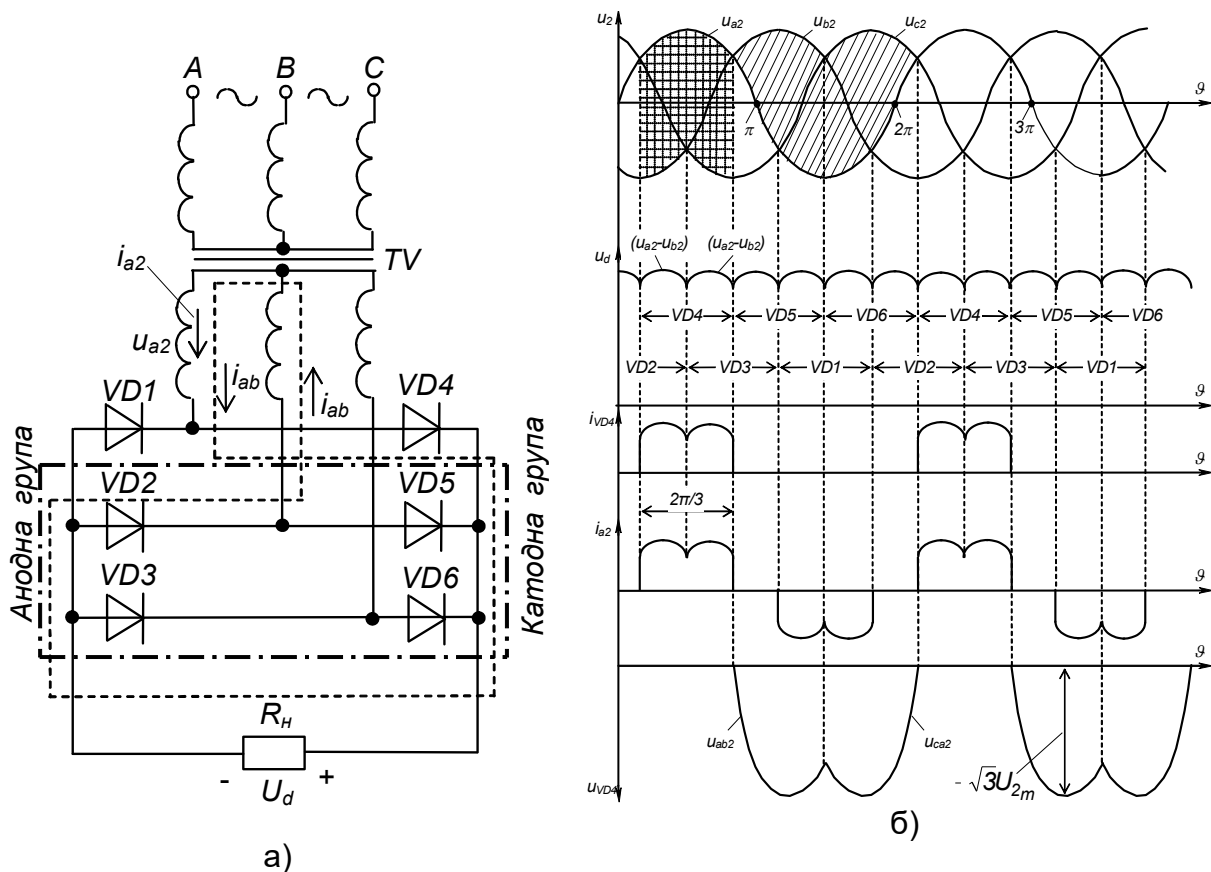


Рисунок 7.5 – Трифазна мостова схема (схема Ларіонова)

Частота пульсації випрямленої напруги більша за частоту мережі у шість разів: $f_{(I)} = 6f_m$.

Амплітуда пульсацій тут значно менша, ніж у розглянутих раніше схемах випрямлення (складає менш за 6 %).

У цій схемі відсутнє підмагнічування магнітопроводу трансформатора, оскільки у вторинному колі кожної з його обмоток за період напруги мережі струм протікає двічі, причому у різних напрямках.

Зворотна напруга на діоді, як і у схемі Міткевича, дорівнює лінійній, а струм через діод також протікає протягом третини періоду.

Основні параметри схеми Ларіонова наведені у таблиці 7.3.

Схема Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича має такі переваги:

- 1) краще використовується трансформатор за потужністю за рахунок відсутності підмагнічування осердя;
- 2) за рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги приблизно у два рази вище (потрібно задавати меншу кількість витків вторинних обмоток трансформатора);
- 3) більш низький коефіцієнт пульсацій, що часто дозволяє використовувати схему Ларіонова без фільтра.

Правда кількість діодів у схемі Ларіонова удвічі більша, але на даний час це несуттєво, оскільки вартість діодів незначна порівняно з вартістю трансформатора, що у схемі Міткевича повинен бути приблизно на 60 % потужнішим.

Таблиця 7.3 – Основні параметри трифазних схем випрямлення

Параметр		Схема випрямлення	
		Міткевича	Ларіонова
Відношення діючого значення напруги вторинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленої напруги	$\frac{U_2}{U_d}$	0,855	0,43
Відношення діючого значення струму вторинної обмотки до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_2}{I_d}$	0,59	0,82
Відношення середнього значення струму діода до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_a}{I_d}$	0,33	0,33
Частота основної гармоніки пульсацій	$f_{(1)}$	3	6
Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги	$K_{n(1)}$	0,25	0,057
Габаритна потужність трансформатора	S_T	$1,67 P_d$	$1,05 P_d$
Наявність підмагнічування	–	є	немає

5.2 Автономні інвертори

5.2.1 Автономні інвертори – це пристрої, що працюють на автономне навантаження і призначені для перетворення напруги постійного струму у напругу змінного струму заданої або регульованої частоти.

Основні області застосування автономних інверторів:

1) живлення споживачів змінного струму, коли єдиним джерелом живлення є джерело напруги постійного струму (акумуляторна батарея, сонячна батарея і т.п.);

2) робота у системах гарантованого електропостачання при зникненні напруги мережі живлення (живлення ЕОМ, вузлів зв'язку, елементів захисту на електростанціях, обладнання реакторів АЕС і т.п.);

3) живлення технологічного устаткування, частота напруги якого відрізняється від промислової частоти (наприклад, становить 400 Гц);

4) перетворення постійної напруги одного рівня у постійну напругу іншого рівня (конвертування напруг);

5) керування швидкістю обертання асинхронних електродвигунів (регульований електропривід).

Комутаційними елементами в автономних інверторах є керовані силові електронні ключі, наприклад, тиристори.

Залежно від специфіки електромагнітних процесів розрізняють інвертори напруги (АІН) та інвертори струму (АІС). Є також резонансні інвертори.

АІС підключаються до джерела живлення, як показано на рисунку 7.6, а, через дросель з великою індуктивністю: комутація ключів здійснюється тут при незмінному струмі. АІС формує у навантаженні струм, а форма напруги залежить від виду навантаження.

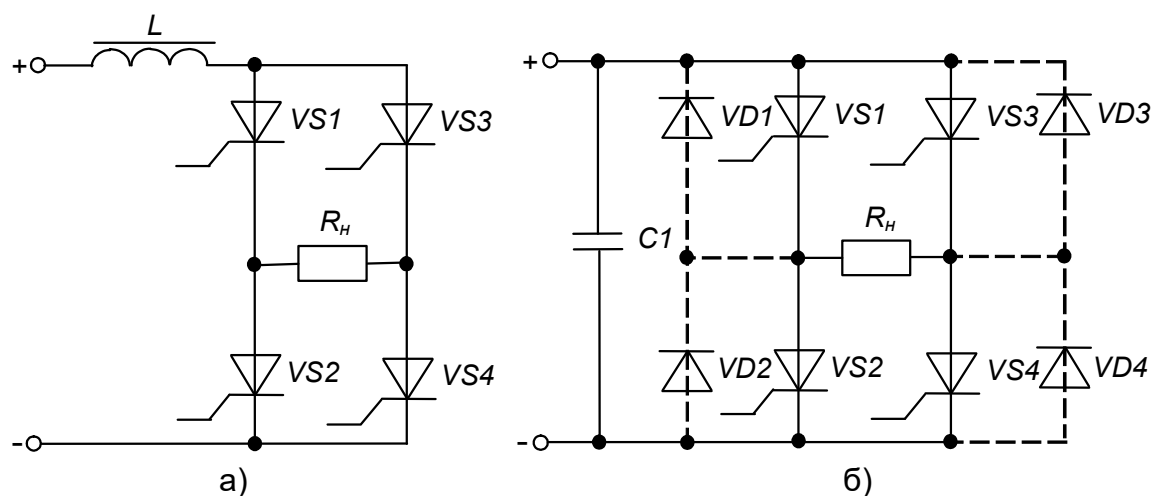


Рисунок 7.6 – Автономні інвертори струму (а) та напруги (б)

АІС є непрацездатним при роботі у режимі холостого ходу, оскільки при цьому в ньому виникають значні перенапруги.

В АІН джерело постійної напруги, як показано на рисунку 7.6, б, шунтується конденсатором великої ємності, завдяки чому виключається вплив внутрішнього опору джерела. Перемикання ключів, у результаті, здійснюється при незмінній напрузі.

АІН формує на навантаженні напругу, а форма струму залежить від виду навантаження.

За допомогою системи керування (на рисунках не показана) здійснюється почергове вмикання пар ключових елементів, що забезпечує протікання через навантаження знакозмінного струму.

Через те, що тиристор відновлює запираючі властивості тільки після припинення протікання через нього струму, виникає проблема вимикання тиристорних ключів постійного струму. Вона розв'язується застосуванням схем (вузлів) примусової комутації, у яких зазвичай використовуються попередньо заряджені конденсатори.

5.2.2 Схема однофазного АІС з нульовим виводом (з трансформаторним виходом) зображена на рисунку 7.7, а часові діаграми, що пояснюють її роботу, на рисунку 7.8.

У якості перемикачів тут використано тиристири $VS1$ і $VS2$. Трансформатор TV з коефіцієнтом трансформації $n = 2w_1/w_2$ має первинну обмотку, що містить дві пів-обмотки з однаковою кількістю витків, і вторинну обмотку, до якої підімкнено навантаження.

Дросель L забезпечує незмінність струму від джерела у моменти перемикання тиристорів.

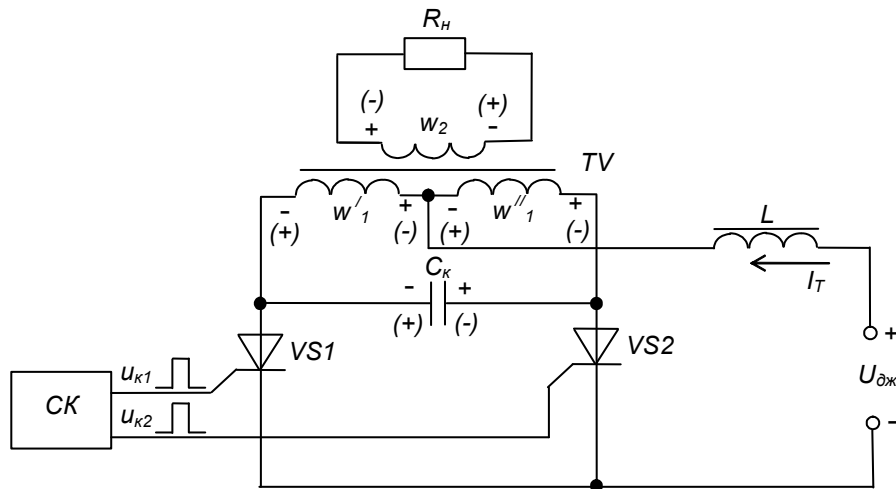


Рисунок 7.7 – Однофазний інвертор струму з трансформаторним виходом

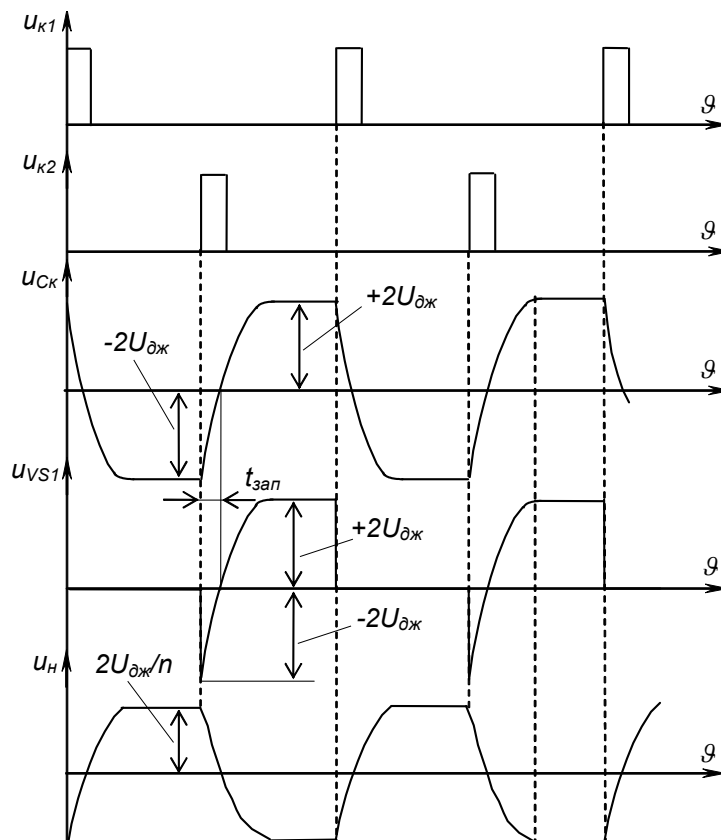


Рисунок 7.8 – Часові діаграми роботи однофазного інвертора струму

Примусове запирання тиристорів забезпечує комутуючий конденсатор C_k .

Керування тиристорами здійснює схема керування $СК$ (наприклад, симетричний мультівібратор у автоколивальному режимі).

Працює інвертор наступним чином.

1) $СК$ подає імпульс вмикання тиристора $VS1$.

2) Тиристор вмикається і напруга джерела живлення подається на ліву півобмотку трансформатора.

3) Під впливом зазначеної напруги магнітопровід трансформатора намагнічується і в іншій півобмотці, а також у вторинній обмотці трансформується напруга з полярністю, вказаною без дужок. На навантаженні формується позитивна півхвиля напруги.

4) Конденсатор C_k , підімкнений паралельно до первинної обмотки трансформатора, заряджається до напруги $2U_{дж}$ через опір, що дорівнює опору навантаження, приведену до первинної сторони $R_n^{(1)} = R_n n^2$.

5) Після закінчення проміжку часу, що відповідає позитивній півхвилі, $СК$ вмикає тиристор $VS2$.

6) Комутуючий конденсатор C_k через $VS2$ підмикається паралельно до $VS1$. Полярність напруги на C_k є такою, що вимикає $VS1$, а ємність повинна бути достатньою для відведення струму від тиристора на час вимикання.

7) Напруга джерела живлення через $VS2$ прикладається до правої півобмотки трансформатора і його магнітопровід перемагнічується у протилежному напрямку. На навантаженні формується негативна півхвиля напруги, конденсатор C_k перезаряджається з полярністю, вказаною у дужках.

8) Після закінчення тривалості наступного півперіоду $СК$ вмикає $VS1$, а $VS2$ запирається і т.д.

Таким чином, форма напруги на навантаженні (активному в даному випадку) визначається формою напруги на комутуючому конденсаторі і залежить від його ємності та опору навантаження. Зі збільшенням опору навантаження стала часу заряду конденсатора збільшується і форма напруги на ньому наближається до трикутної. Її амплітуда при цьому збільшується (при збереженні середнього за півперіод значення напруги). В результаті, при холостому ході за відсутності втрат у елементах пристрою напруга на навантаженні та конденсаторі безмежно (теоретично) зростає – джерело струму (дросьель) намагається підтримувати значення струму незмінним. Це може призвести до виходу з ладу елементів інвертора.

Контрольні запитання

1) Наведіть схему і поясніть принцип дії трифазного випрямляча з нульовим виводом (схеми Міткевича).

2) Наведіть схему і поясніть принцип дії трифазної мостової схеми (схеми Ларіонова).

- 3) *Покажіть, як протікає струм у довільний момент часу в схемі Міткевича і у схемі Ларіонова.*
- 4) *Поясніть форму зворотної напруги на діоді трифазних схем випрямлення.*
- 5) *Поясніть форму напруги на навантаженні трифазних схем випрямлення.*
- 6) *Поясніть форму струму в навантаженні трифазних схем випрямлення.*
- 7) *Виконайте порівняльний аналіз схем Міткевича і Ларіонова, поясніть, чому саме ці схеми переважно використовують для живлення навантажень середньої і великої потужності.*
- 8) *Поясніть призначення і принципи будови автономних інверторів.*
- 9) *Поясніть, як за допомогою інвертора можна перетворити постійну напругу одного рівня у постійну напругу іншого рівня.*
- 10) *Наведіть схему АІС з нульовим виводом і поясніть її роботу.*
- 11) *Поясніть процес комутації тиристорів у АІС з нульовим виводом.*

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

Список рекомендованих джерел

1. Сосков А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський ; за ред. А. Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2015. – 536 с.
2. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.
3. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с.
4. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. школа, 1982. – 496 с.
5. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
6. Красько А. С. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшейшая школа, 1984 – 208 с.

Список використаних джерел

1. Електроніка та мікросхемотехніка : лабораторний практикум (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 –Електромеханіка) / Харків. нац. акад. міськ. госп-ва ; уклад. Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков, О. Ф. Білоусов – Харків, ХНАМГ, 2013. – 154 с.
2. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.

ДОДАТОК А

Зміст звіту про лабораторну роботу

Звіт про лабораторну роботу – це документ, що вміщує опис проведених експериментів, отримані результати у вигляді таблиць, графіків (осцилограм) тощо, розрахункові значення та висновки з виконаної роботи.

Звіт містить:

1) **титульний аркуш**, на якому необхідно вказати (приклад оформлення титульного листа наведено на рисунку А1):

- а) адміністративну приналежність навчального закладу;
- б) назву навчального закладу (повну та скорочену);
- в) назву кафедри, що проводить заняття;
- г) слова «ЗВІТ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ №» і далі номер та назву лабораторної роботи;
- д) номер курсу і групи, прізвище та ініціали виконавця;
- е) підпис виконавця і дату виконання роботи;
- ж) вчене звання (посаду), вчену ступінь, прізвище та ініціали викладача;
- и) назву міста та рік складання документа;

2) **текст звіту**, до якого входять:

- а) мета лабораторної роботи;
- б) перелік устаткування та вимірювальних приладів;
- в) схеми установок, на яких проводились експерименти, або схеми електронних пристроїв, що досліджувались (*виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя – рекомендується застосовувати радіотехнічний трафарет*);
- г) таблиці з експериментальними і розрахунковими даними та побудовані за ними графіки;
- д) розрахункові формули (у схемах, таблицях і формулах необхідно застосовувати стандартні умовні позначення);
- е) осцилограми;
- ж) висновки, у яких наводяться пояснення отриманих результатів.

Міністерство освіти і науки України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ЗВІТ
про лабораторну роботу № 1
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ
ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ

Виконала: студентка 3 курсу групи ЕСЕ 2018-1

Вакуленко К. Є.

Прийняв: доцент, канд. техн. наук

Колонтаєвський Ю. П.

Харків – 2020

Рисунок А1 – Приклад оформлення титульного аркуша

Навчальне видання

Лабораторний практикум
із навчальних дисциплін

«ІНФОРМАЦІЙНА ЕЛЕКТРОНІКА»
та
«ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ»

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі : **КОЛОНТАЄВСЬКИЙ** Юрій Павлович,
ТУГАЙ Дмитро Васильович

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Ю. П. Колонтаєвський*

Дизайн обкладинки *Ю. П. Колонтаєвського*

План 2020, поз. 200М

Підп. до друку 18.02.2020. Формат 60 × 84 /16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 6,7
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.

Письмена можуть бути
втрачені,
брехня може бути
написана,
але те, що побачили очі,
є істина
і залишається в пам'яті.

Джозеф Конрад